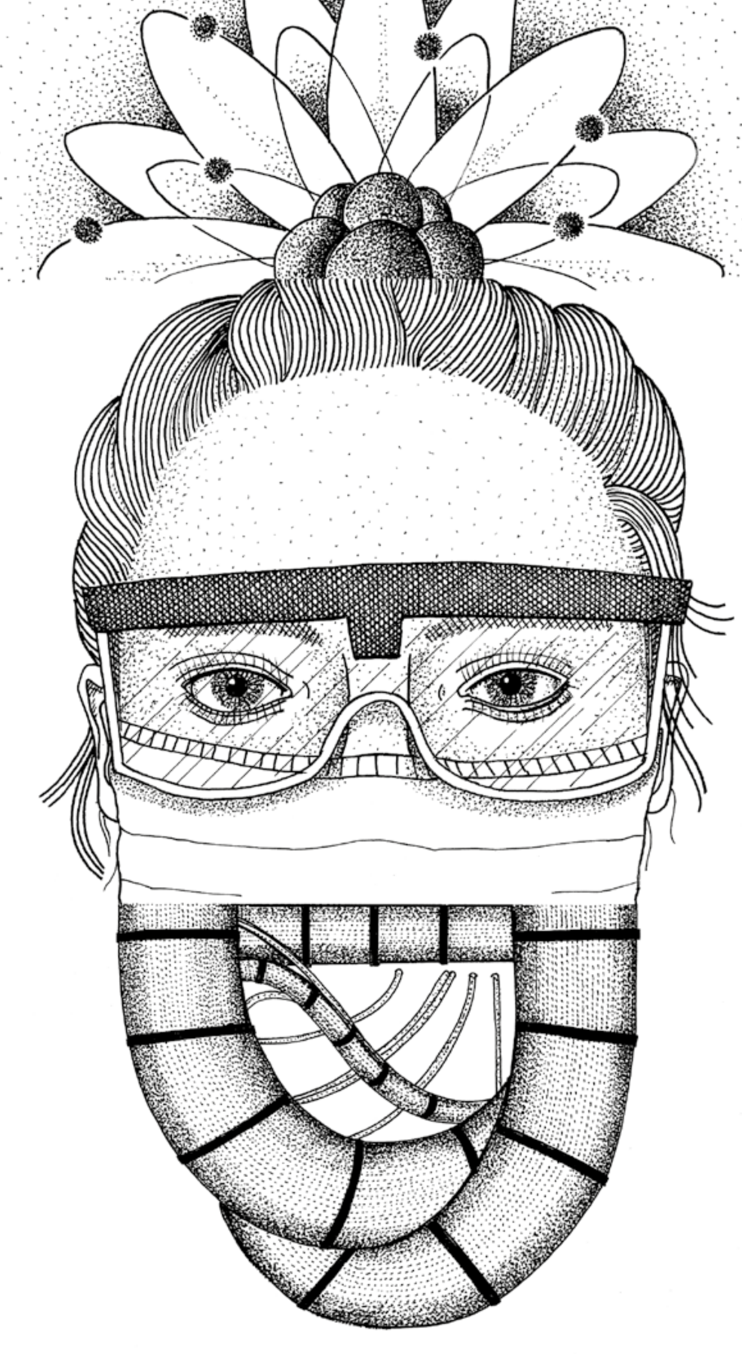
01 LA REVUE DU CEA



NUCLÉAIRE
Les nouveaux horizons
– Page 12

EXASCALE
Un accélérateur pour la science et l'innovation
– Page 32

MICROÉLECTRONIQUE
Le retour d'une filière européenne
– Page 46



Juin 2023

Revue éditée par le CEA
Direction de la communication
91191 Gif-sur-Yvette cedex - FR

Directeur de la publication
Marie-Ange Folacci

Coordination
Boris Le Ngoc

Rédaction en chef
Laetitia Baudin

Rédaction
Laetitia Baudin, Audrey Dufour
et Sylvie Rivière

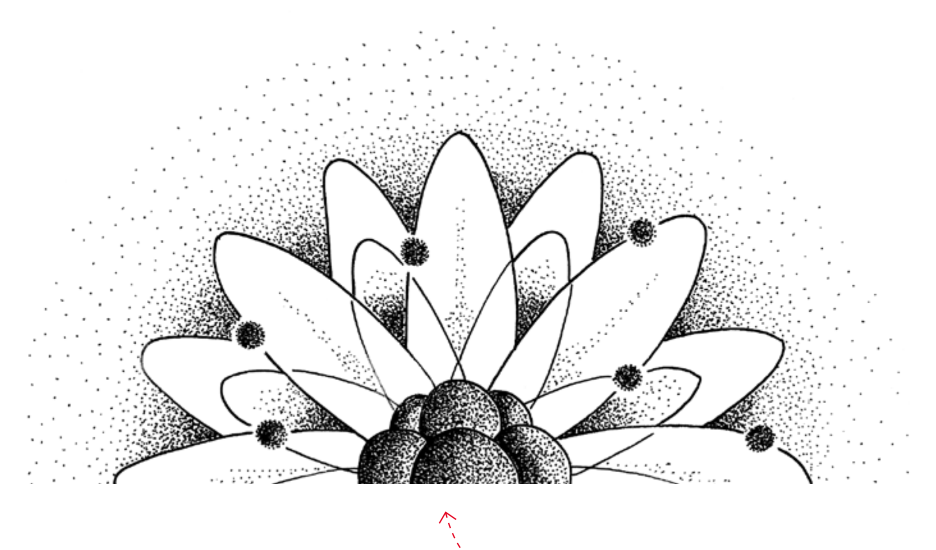
Iconographie
Christelle Comoy

Comité éditorial
Renaud Blaise, Vincent Coronini, Anne Guérin,
Valérie Vandenberghe.
Avec le concours scientifique de Philippe Chomaz,
Hervé Desvaux, Christian Gamrat, Étienne Klein,
Eric Proust et Olivier Vacus.

Illustration de couverture
La Hache illustration

Conception graphique
bearideas

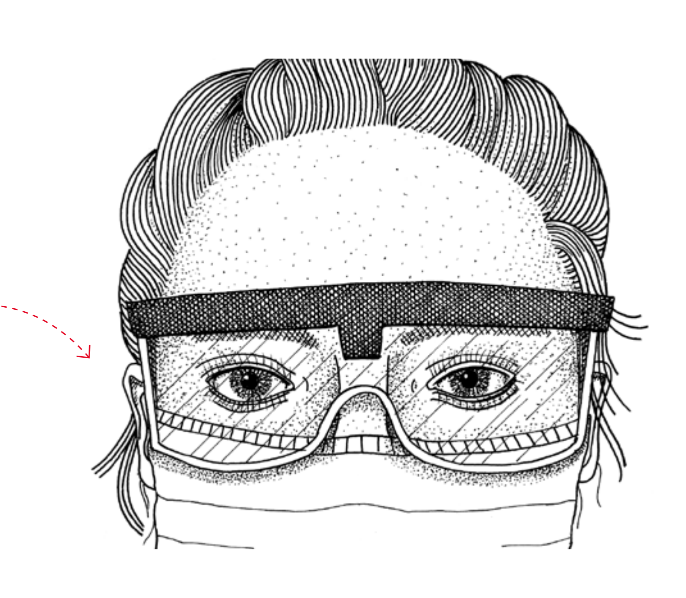
Des remarques, des suggestions ?
Écrivez-nous à revue@cea.fr

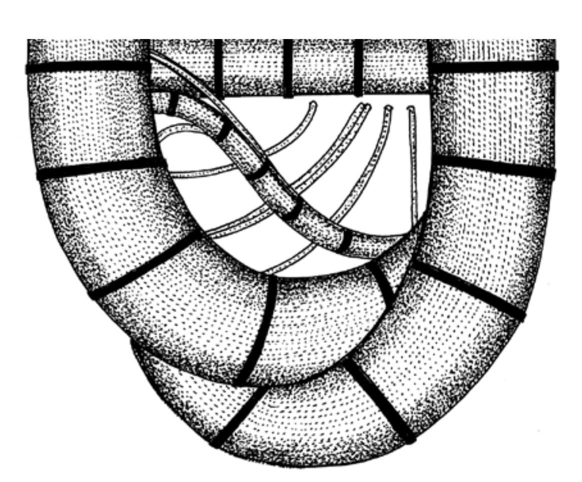


L'atome, symbole du nucléaire et de la stratégie de décarbonation. Avec un objectif : 0 émission nette de CO_2 d'ici 2050 !

La couverture déchiffrée

Un regard perçant, abrité derrière des lunettes et un masque. Dans les salles blanches du Leti, le laboratoire d'électronique et de technologie de l'information du CEA, à Grenoble, la combinaison intégrale est de rigueur.





Des câbles qui transportent des informations à une vitesse folle. Voilà à quoi ressemblent l'envers du décor de l'exascale et ses capacités de calcul incomparables !

La force du CEA réside dans sa position au carrefour des grandes transitions en cours.

Éditorial
Marie-Ange Folacci
directeur de la communication

Face aux grands défis, le CEA mobilise le meilleur de la recherche française. C'est là sa mission, son identité même.

Les défis qui nous attendent sont complexes, en matière d'énergie, d'usages, de connectivité, de mobilité, de santé et d'autres encore. La force du CEA réside dans sa position au carrefour de ces grandes transitions. Nos activités s'enrichissent les unes des autres. La course technologique à l'exascale (Page 32), utilisée notamment dans le cadre de la dissuasion, prend ainsi tout son sens dans les applications possibles, pour explorer le cerveau et l'Univers, mieux modéliser le climat et les plasmas.

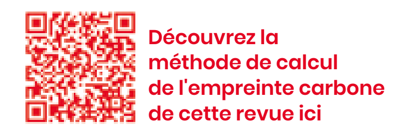
Se préparer aux défis qui arrivent, c'est aussi assurer notre compétitivité et notre souveraineté dans un monde en tensions. Organisme public en lien étroit avec le tissu industriel, le CEA prend pleinement sa place dans les stratégies nationales et européennes, comme l'illustre le renouveau de la filière microélectronique (Page 46).

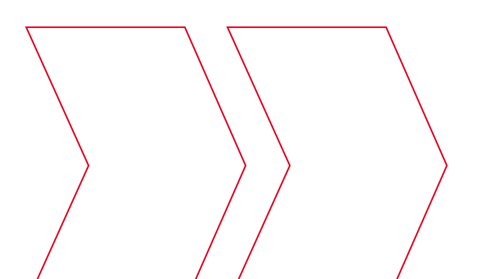
Mais il ne s'agit pas de fabriquer des puces de téléphone portable ou des supercalculateurs pour le plaisir du « toujours plus ». Préparer l'avenir implique des responsabilités, notamment face aux changements climatiques à l'œuvre.

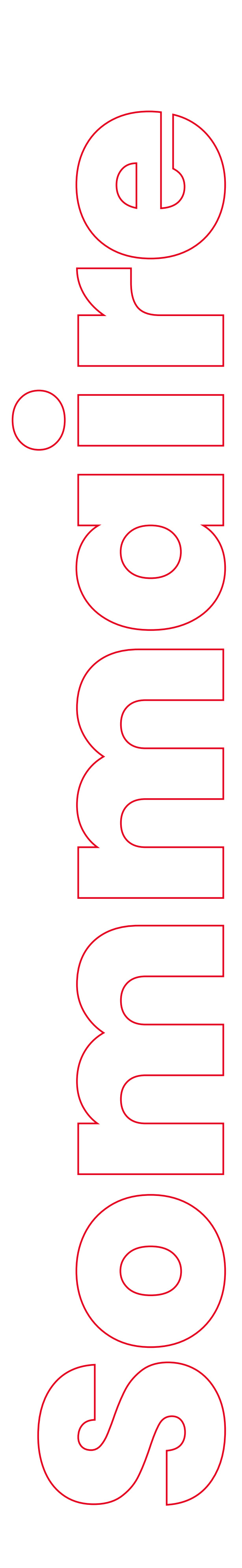
Dans le domaine de l'énergie, le CEA bénéficie d'une longue expérience qui lui permet de développer des alternatives vitales pour atteindre la neutralité carbone. À l'image des petits réacteurs nucléaires modulaires (Page 16), nous nous devons de proposer une vision systémique de l'énergie qui permette de dessiner des futurs où les technologies bas carbone se déploient à mesure que d'autres pratiques sociales, plus sobres, émergent.

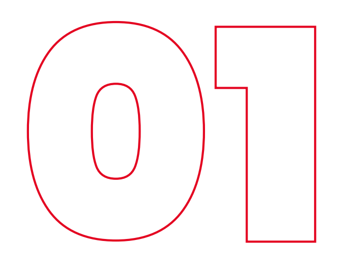
Préparer la France aux grands défis, enfin, c'est accepter que nos pratiques d'hier ne pourront pas être celles de demain. Cela ne veut pas dire oublier le passé : nos savoir-faire et nos compétences doivent venir appuyer la curiosité, la créativité et l'innovation qui permettront de réussir les transitions.

Transition dans laquelle s'inscrit cette nouvelle revue, avec une empreinte carbone la plus réduite possible…









Les nouveaux horizons du nucléaire

Place aux petits réacteurs **16**


© A. Aubert/CEA

Le nucléaire : mission décarbonation **20**

Nuward™, prêt à décoller **22**

Nuward™, l'ambition européenne **24**

Coach de start-up **26**

Start-up essaimées du CEA **28**



Dans les coulisses du CEA 6

Ancrage : Le CEA à... Marcoule 30

Making-of : Cure de jouvence pour Ramsès II 44

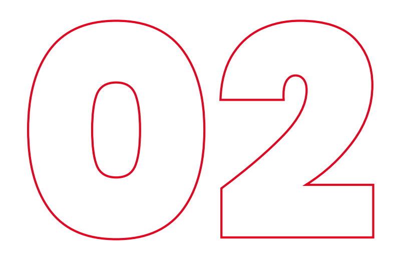
Carte blanche : La mixité dans les carrières scientifiques 62

Playlist 64

Save the date : Mission Euclid 65

Le bon mot 66





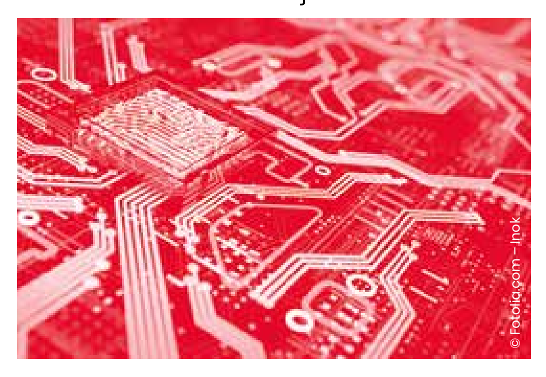
La révolution de l'exascale

Le mot de…
Sylvie Retailleau **33**

Aux origines du calcul **34**

Cinq grands enjeux
de l'exascale **35**

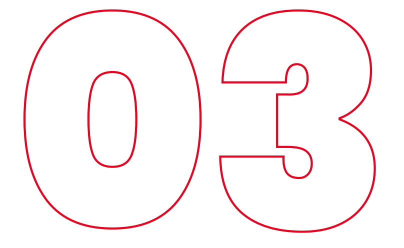
La France et l'Europe
ont-elles une carte à jouer ? **36**



© Fotolia.com – Jnok

L'exascale fait son nid **39**

Les territoires de l'exascale **42**



L'Europe renoue avec la micro-électronique

L'implication du CEA **51**

La CEA accompagne
les industries européennes **52**

Focus sur les
technos d'avenir **54**

L'éco-innovation :
un impératif pour tous **56**

Plongée dans une salle blanche
de Grenoble **58**



© A. Aubert/CEA

Dans les coulisses du CEA

Intelligence artificielle, vaccin contre le chikungunya, chargeur pour batteries électriques, 672 brevets déposés… Passage en revue des dernières actualités qu'il ne fallait surtout pas manquer !

CLIMAT

9,9 milliards

C'est le nombre d'arbres comptés par l'IA dans une vaste région semi-aride de l'Afrique sub-saharienne. La méthode, mise au point avec le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA-CNRS-UVSQ) a combiné données de terrain et images satellitaires (ici, plus de 300 000) pour aboutir à une précision inégalée. Au-delà du nombre d'arbres, l'exercice a permis de déterminer leurs caractéristiques (taille, surface de la couronne, biomasse, etc.) donnant ainsi accès au stock de carbone associé. Les bénéficiaires de ce nouvel outil sont nombreux : acteurs de terrain, décideurs (pour la restauration des forêts, l'agriculture, les mesures d'atténuation du changement climatique, la protection vis-à-vis des dégradations forestières illégales) et scientifiques pour les simulations du climat. Cette première base de données est désormais mise à disposition de la communauté.

SÉCURITÉ

Counteract est lancé !

Counteract, c'est le nom d'un nouveau projet destiné à renforcer la préparation de l'Union européenne face aux menaces nucléaires, radiologiques, biologiques et chimiques (NRBC) actuelles et futures. Cofinancé par le Fonds européen de défense à hauteur de 49 millions d'euros et prévu pour durer quatre ans, il est coordonné par le CEA et rassemble 26 acteurs européens majeurs issus de 11 États. Objectif : développer des contre-mesures médicales en visant l'autonomie européenne. Le CEA mettra à disposition toutes ses connaissances scientifiques dans les domaines de la virologie, de l'immunologie, de la pharmacologie et de la radiobiologie.



© L. Godart/CEA

Vue du laboratoire L3 du CEA (confinement biologique de niveau 3), adapté aux agents pathogènes à transmission par aérosols.



Agrafes en fer des murs supérieurs de Notre-Dame de Paris.

© L'Héritier et al.

DATATION

L'origine du fer de Notre-Dame

Douze agrafes en fer ont été prélevées dans les blocs de pierre de Notre-Dame de Paris, sous la charpente incendiée en 2019. Des analyses métallographiques, chimiques et de datation radiocarbone ont été effectuées par les équipes du CEA. Les résultats indiquent que ces agrafes remontent au début de la construction de la cathédrale, aux 12ème et 13ème siècles. « *Notre-Dame est incontestablement la première cathédrale gothique de l'Histoire où le fer a été pensé comme un véritable matériau de construction* », concluent les experts.



Pour retrouver toutes les actions du CEA en faveur de l'Histoire et du patrimoine

PHARMACOLOGIE

Sus au plastique !

Peut-on conditionner des médicaments à base de protéines purifiées solubilisées comme les anticorps monoclonaux thérapeutiques ou de diagnostic, dans des flacons en polypropylène, un matériau plastique aujourd'hui largement utilisé ? Pas sûr, comme le montre une étude menée par des équipes du CEA et leurs partenaires. Au contact de la paroi en plastique, et *a fortiori* sous l'effet d'une agitation, une partie de ces biomédicaments se dégrade, formant des agrégats. Conséquence : un médicament bien moins efficace, voire induisant des effets indésirables chez le patient.

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Rédiger des courriers ? Facile !

30 000 à 40 000 plaintes de consommateurs ! C'est le nombre de dossiers que doit traiter chaque année la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF), une activité chronophage et complexe. Grâce aux algorithmes d'IA développés par le CEA, ces tâches pourront être accélérées, tout en conservant une excellente qualité de service. L'outil rédige et propose aux agents de la DGCCRF des paragraphes type de réponse en analysant les données entrantes (mails, pièces jointes, formulaires...). Cet outil a reçu le deuxième prix « coup de cœur » de Bercy Innov, un concours d'innovations technologiques organisé par le ministère de l'Économie.

NEUROSCIENCES

Faire remarcher les paraplégiques par la pensée

Il est paraplégique, marche en actionnant le mouvement de ses jambes par la pensée, et c'est une première ! Cette réussite est le fruit du travail commun du CEA (au sein du centre de recherche biomédicale Clinatec, associant le CEA, le FDD Clinatec, le CHUGA et l'UGA) et d'équipes suisses (EPFL, CHUV et Unil). Le dispositif repose sur l'association de deux dispositifs médicaux implantables. Le premier est placé à la surface du cortex cérébral, et le second au niveau de la région de la moelle épinière commandant le mouvement des jambes. Grâce à des algorithmes d'intelligence artificielle, les signaux électriques cérébraux issus des intentions de mouvement sont captés, numérisés, décodés et convertis en séquences de stimulation électrique de la moelle épinière !



© A. Aubert/CEA

Implant cérébral développé par le CEA.

Découvrez cette marche en vidéo



AUTOMOBILE

Des chargeurs pour Renault

En coopération avec Renault, le CEA a mis au point un nouveau chargeur pour les batteries des véhicules électriques. Ce convertisseur de puissance, développé à partir de matériaux innovants, permettra de réduire les pertes d'énergie de 30 % et de charger plus rapidement le véhicule. Il est également bidirectionnel, c'est-à-dire qu'il peut réinjecter l'énergie stockée dans le réseau électrique. De quoi répondre à la production intermittente des énergies renouvelables. Onze brevets communs ont été déposés dans le cadre de ce projet.


© Wikimedia Commons/CC

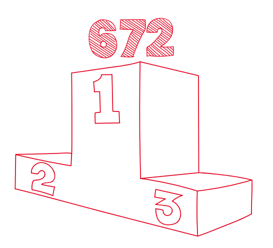
SANTÉ

Vers un vaccin contre le chikungunya

Le virus du chikungunya, transmis par le moustique tigre, provoque des arthrites très douloureuses et invalidantes. Plusieurs grandes épidémies se sont déclarées ces vingt dernières années, avec des millions de cas répertoriés. Et des cas autochtones sont récemment apparus en Italie. La recherche d'un vaccin, à laquelle contribue le CEA, est donc cruciale. Ses équipes ont franchi une étape importante vers l'homologation d'un candidat vaccin de type « virus atténué », simple à mettre en œuvre : le sérum de volontaires humains vaccinés a en effet conféré à des modèles primates une protection contre le virus !

BREVETS





Pour la dixième année consécutive, le CEA est en tête des organismes de recherche français en nombre de brevets déposés, d'après le palmarès 2022 de l'Inpi, l'Institut national de la propriété industrielle.
Et les chiffres sont en hausse : 672 demandes ont été faites contre 630 pour la période précédente.
Toutes catégories confondues, le CEA arrive troisième, derrière Safran et Stellantis.


© CEA

↑ Le panneau démonstrateur éco-conçu par les équipes du CEA.

PHOTOVOLTAÏQUE

317 kg CO_2eq/kWc

C'est le faible bilan carbone du panneau photovoltaïque réalisé par le CEA au sein de l'institut national de l'énergie solaire. L'épaisseur des plaquettes de silicium et du panneau en verre a été réduite, l'usage d'indium et d'argent limité, et le cadre est en matière végétale au lieu d'aluminium. À rendement équivalent, les équipements chinois affichent un bilan carbone de 700 à 800 kgCO_2eq/kWc.

ASTROPHYSIQUE

Chaude journée sur Trappist-1b

Les équipes conjointes du CEA, de la Nasa et de l'université de Californie ont mesuré, pour la première fois, l'émission de lumière de l'exoplanète Trappist-1b. Leurs travaux, publiés dans *Nature*, montrent qu'il y fait 230 °C et que la planète n'a probablement pas d'atmosphère. Plus que ces résultats, c'est surtout la manière d'y parvenir qui est notable. Et qui doit beaucoup à l'imageur Mirim, conçu par le CEA et embarqué à bord du télescope Webb. Cela ouvre la voie à des analyses similaires pour les autres planètes du système Trappist, dont certaines situées dans la zone habitable par rapport à leur étoile.


© L. Godart/CEA

Inspection et vérifications fonctionnelles de l'imageur Mirim, à Saclay en 2007.



Retrouvez le podcast d'Elsa Ducrot, astrophysicienne au CEA qui étudie le système Trappist-1 depuis six ans et cosignataire de la publication

Retrouvez toutes nos autres actus sur cea.fr

Cette encre UV LED désencrable représente 61 kg de CO_2 eq. émis (soit 0,05 % de l'empreinte carbone totale de la revue).

DÉFENSE

Le SNA Duguay-Trouin prend la mer

Après le Suffren, le Duguay-Trouin. Ce deuxième sous-marin nucléaire d'attaque (SNA) nouvelle génération a effectué sa première sortie en mer fin mars. Les essais, gérés par la Direction de l'armement et la Direction des applications militaires du CEA, devraient bientôt s'achever. Menés dans l'Atlantique et en Méditerranée, ils visent à s'assurer de l'ensemble des capacités techniques et opérationnelles du sous-marin, dont sa propulsion. La livraison à la Marine nationale est prévue durant l'été.


© Marine nationale



© A. Aubert/CEA

Les nouveaux horizons du nucléaire

Dans un contexte de crises climatique, énergétique et de souveraineté, il souffle comme un air de renouveau sur la filière nucléaire (Page 14). Les projets de R&D se multiplient pour développer des petits réacteurs (Page 16) répondant aux besoins de décarbonation. Moins coûteux par leur taille, plus flexibles dans leurs possibilités d'application, d'une sûreté plus e à démontrer, ils pourraient bien réinventer la filière. En France, le programme de relance France 2030 (Page 15) y consacrera un milliard d'euros. Comment le CEA, acteur de référence pour la R&D nucléaire française, apporte-t-il sa contribution à cet élan ? Avec une vision, de l'innovation et des projets.

←
Plateforme expérimentale en piscine pour la qualification de dispositifs de mesures utilisés auprès de réacteurs nucléaires.



États-Unis, Chine, Japon, Pays-Bas, Suède… Indéniablement, le nucléaire est de retour dans l'équation énergétique mondiale. Même dans des pays jusque-là réticents comme la Suède ou la Belgique, il redevient une option. À cela, plusieurs causes. La première est l'évidence de la crise climatique et la décarbonation impérative de nos activités qui en résulte, condition *sine qua none* pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre, au premier rang desquels figure le CO_2. Une urgence que les phénomènes météorologiques exceptionnels de l'année 2022 sont venus mettre en lumière – ouragans aux États-Unis, inondations au Pakistan, canicule extrême en Inde, sécheresse en Chine, records de chaleur aux pôles – accélérant au passage la prise de conscience collective.

Pour y faire face, plus de 70 pays, dont les États-Unis et ceux de l'Union européenne, se sont engagés à la suite de la signature de « l'Accord de Paris »[1] à atteindre la neutralité carbone en 2050 ; la Chine, l'Inde et la Russie visant de leur côté une échéance en 2060. Le principe : réussir à compenser les émissions de gaz à effet de serre générées par l'activité humaine, par leur extraction de l'atmosphère selon des voies naturelles ou artificielles. L'Europe, ambitieuse, a fixé un objectif intermédiaire, « *Fit for 55* », visant à réduire d'au moins 55 % les émissions nettes de ces gaz d'ici 2030 par rapport à 1990.

←
Plateforme expérimentale pour l'étude des composants des réacteurs nucléaires. Ici, positionnement de crayons de combustibles factices.

Un paysage énergétique en mutation

À cet impératif climatique est venue se superposer une crise énergétique mondiale, marquée par une explosion du prix des énergies fossiles et des difficultés d'approvisionnement. Initiée fin 2021 par la reprise post-Covid de l'économie mondiale, elle s'est brutalement accélérée en février 2022 avec le conflit Russie-Ukraine. Dans un monde en profonde mutation, la souveraineté énergétique (nécessaire pour s'affranchir de notre dépendance aux pays producteurs de pétrole et de gaz), l'efficacité et la sobriété énergétiques, la transformation de nos usages (dans les transports, les logements, l'industrie...) sont désormais des priorités stratégiques. Le recours massif aux énergies bas carbone en lieu et place des énergies fossiles, s'il était déjà urgent et incontournable, l'est davantage...

L'ambitieux programme France 2030

C'est dans ce contexte que l'énergie nucléaire, aux côtés des renouvelables, connait un regain d'intérêt : elle est pilotable, non émettrice de CO_2, compétitive par rapport au marché des énergies fossiles, et financièrement stable, un argument de poids dans le contexte actuel de grande volatilité des prix. Enfin, elle est synonyme pour la France d'une meilleure indépendance énergétique. L'opinion elle aussi évolue, comme le montrent de récents sondages : 60 % des Français ont en 2023 une image positive du nucléaire alors qu'ils n'étaient que 34 % à le penser en 2019[2].

S'inscrivant dans ce mouvement, le gouvernement français a initié en octobre 2021 un ambitieux programme de relance, France 2030, pour accélérer l'innovation dans des secteurs clés de l'économie. Dix objectifs y sont énoncés, parmi lesquels décarboner notre industrie en réduisant nos émissions de gaz à effet de serre de 35 % ; et faire émerger des réacteurs nucléaires de petite taille, innovants et gérant mieux leurs déchets. Une posture réaffirmée et précisée par le chef de l'État en février 2022, en dévoilant la nouvelle stratégie énergétique du pays. Parmi les annonces : le prolongement au-delà de 50 ans de la durée de vie des réacteurs en service ; la construction de six réacteurs EPR d'ici 2050 et le lancement d'études pour la construction de huit autres, volet confié à EDF et ses partenaires industriels ; la confirmation d'un budget de 500 millions d'euros pour le projet Nuward™ de petit réacteur modulaire, dont un premier prototype est attendu pour 2030, et de 500 millions supplémentaires pour la conception de petits réacteurs innovants portés par de nouveaux entrants.

Des projets dans lesquels le CEA, organisme de recherche technologique à forte culture de transfert industriel et d'essaimage vers des start-up est idéalement positionné, ainsi que l'a rappelé le chef de l'État dans son discours de février 2022 : « *Le CEA, qui a joué un rôle décisif dans la naissance de la filière nucléaire française, appuiera et accompagnera la montée en puissance de ces nouveaux acteurs [les start-up du nucléaire]* ».

L'Europe a fixé un objectif intermédiaire visant à réduire d'au moins 55 % les émissions nettes de gaz à effet de serre d'ici 2030 par rapport à 1990.

60 % des Français ont en 2023 une image positive du nucléaire.

(1) Signé en 2015 lors de la Cop 21. Objectif : limiter le réchauffement du climat en-deçà de 2 °C, et si possible en-deçà de 1,5 °C.

(2) Sondage Odoxa, réalisé pour Le Figaro. Janvier 2023.

Place aux petits réacteurs

S'adapter, voire se réinventer. Et vite. Voilà les maîtres-mots de la filière nucléaire pour relever les défis posés par le tandem de l'urgence climatique et de la souveraineté. Comment ? En organisant différemment la fourniture d'énergie, au plus près des clients et pour des usages allant bien au-delà de la seule production d'électricité. Et en intégrant de nouveaux concepts de réacteurs, plus petits et plus flexibles.

Comment arriver en 2050 à un monde neutre en carbone tout en satisfaisant une demande en énergie qui ne cesse d'augmenter, poussée par la croissance démographique et l'urbanisation induite, et par la digitalisation galopante de nos pratiques et outils industriels ? D'abord en diminuant notre consommation globale d'énergie de 40 % par rapport à 2015, indique la Stratégie nationale bas carbone, par des actions d'efficacité et de sobriété énergétiques. Et en électrifiant massivement nos usages. RTE, le gestionnaire du réseau de transport d'électricité, estime notre consommation d'électricité en 2050 à 645 TWh contre 449 en 2020 dans son scénario de référence, passant de 25 à 55 % de notre consommation d'énergie[1].

Mobiliser toutes les énergies bas carbone

« *Nous sommes face à une demande gigantesque d'énergie décarbonée* », prévient Jérôme Garcin, chef de la cellule valorisation des programmes énergie du CEA. Y répondre exigera non seulement la mobilisation de toutes les énergies bas carbone, nucléaire et renouvelables, et ce dès la décennie 2030 ; mais aussi de faire émerger puis d'industrialiser des solutions de rupture dans les technologies de production et de distribution d'énergie.

(1) Étude prospective « Futurs énergétiques 2050 » présentée en octobre 2021.



Car à la demande d'électricité, il convient aussi d'ajouter d'immenses besoins de chaleur décarbonée industrielle. Les aciéries, cimenteries, industries du verre ont par exemple besoin de très hautes températures, supérieures à 500 °C ; tandis que d'autres secteurs, métallurgie, papier, plastique, chauffage urbain, dessalement d'eau de mer ou encore textile, sont à la recherche de températures inférieures à 300 °C. Ces pans entiers de l'industrie sont très dépendants du gaz et restent difficiles à électrifier. Ajoutons à cela la montée en puissance de la production d'énergies décarbonées, elle aussi consommatrice de chaleur et d'électricité : hydrogène, et à plus long terme, carburants de synthèse via la capture de CO_2, pour l'aéronautique et le transport maritime.

Une vision intégrée de l'énergie

Pour absorber ce changement d'échelle, le CEA prône une vision intégrée du système énergétique, incluant plusieurs piliers interconnectés : production d'énergies bas carbone (nucléaire, renouvelables, hydrogène, carburants de synthèse…) ; solutions de flexibilité et de stockage pour compenser la variabilité des renouvelables, s'appuyant sur les batteries, mais aussi sur l'hydrogène ; réseaux « intelligents » à même de traiter des flux importants de données en temps réel pour gérer les pics de consommation en fonction des énergies disponibles ; le tout dans une logique d'économie circulaire des matières, allant des combustibles nucléaires aux matériaux critiques des composants électroniques (batteries, éoliennes, panneaux photovoltaïques). « *Nous souhaitons porter toutes les options permettant d'atteindre la neutralité carbone au moindre coût pour la société et en renforçant notre souveraineté* », résume Stéphane Sarrade, le directeur des programmes énergies du CEA.

« Nous souhaitons porter toutes les options permettant d'atteindre la neutralité carbone au moindre coût pour la société et en renforçant notre souveraineté. »

Stéphane Sarrade, directeur des programmes énergies du CEA

Dans ce mix, le nucléaire, une énergie pilotable, joue un rôle crucial. Mais il doit innover pour s'adapter à ces nouveaux besoins de décarbonation. « *55 % d'électricité en 2050, c'est beaucoup*, confie Stéphane Sarrade. *Nous aurons besoin de plus de nucléaire de puissance, c'est le sens de la construction des EPR annoncée par le président de la République. Et il sera complété par une nouvelle offre portée par des petits réacteurs nucléaires. Ceux-là viendront proposer des services complémentaires, totalement inédits pour la filière : de l'électricité locale aux*



←
Toutes les énergies bas carbone, nucléaire et renouvelables, seront nécessaires pour diminuer les émissions de CO_2. Ici, des recherches au CEA sur les biocarburants produits à partir de micro-algues.

territoires en synergie avec les énergies renouvelables, mais surtout de la chaleur pour les industries lourdes, la production d'hydrogène, etc. C'est une des facettes d'une vision intégrée de l'énergie ». France 2030 est venu donner une impulsion à l'innovation en soutenant le développement de ces petits réacteurs (à fission ou à fusion). « *Le programme sollicite exclusivement de nouveaux entrants, au-delà des organismes historiques,* souligne l'expert. *Ceci pour pousser à l'émergence de nouveaux concepts, modèles économiques, écosystèmes industriels et modes de financement, typiquement portés par des modèles start-up* ».

L'univers des petits réacteurs

Pour comprendre l'intérêt et la pertinence de ces petits réacteurs, une explication s'impose. Ces concepts, qu'on appelle SMR (*small modular reactor*), AMR (*advanced modular reactor*) ou MMR (*micro modular reactor*) sont en rupture totale avec la philosophie des réacteurs de puissance. « *L'idée sous-jacente, apparue aux États-Unis il y une vingtaine d'années, a été de jouer sur l'effet de série pour abaisser les coûts d'investissement et de construction, plutôt que de viser une économie d'échelle par la taille du réacteur* », raconte Jean-Claude Garnier, en charge du programme de réacteurs de 4ème génération. Ces petites centrales, dont la puissance s'échelonne entre 50 et 300 MWe[2], sont plus simples à construire grâce à une architecture allégée, sont fabriquées en usine par modules, faciles à transporter, puis à assembler sur site. Effet induit, leur sûreté est plus simple à mettre en œuvre, souvent de manière passive, s'appuyant par exemple sur la convection naturelle.

SMR et AMR se distinguent entre autres par leur technologie. Les premiers s'appuient sur celle bien connue, mature et maîtrisée, des réacteurs à eau (pressurisée ou bouillante), dite de 2ème et 3ème générations. « *Trois réacteurs sur quatre dans le monde sont des réacteurs à eau pressurisée* », rappelle Jean-Claude Garnier, si bien que les premiers déploiements de SMR au niveau international sont attendus pour le début 2030.

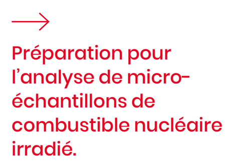
Les AMR s'apparentent quant à eux à des technologies de 4ème génération : réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, au plomb ou au gaz, réacteurs à sels fondus, à haute température, à eau supercritique. Plus disruptifs et moins matures, ils devraient se déployer ultérieurement, dans les années 2030. Les MMR, enfin, sont des versions miniatures des SMR et des AMR (1 à 20 MWe). Facilement transportables, ils visent d'autres usages : remplacement de groupes électrogènes, transport maritime, zones isolées, spatial…

Assurer la souveraineté énergétique à long terme

Tous ces modèles, ou presque, sont gréés pour de la cogénération : électricité décentralisée et chaleur. À ceci près que les AMR l'emportent sur les SMR en matière de température : jusqu'à 800 °C, versus un maximum de 250 °C. « *La plage de chaleur la plus demandée en Europe se situe entre 250 et 500 °C. Les AMR pourront répondre à d'immenses besoins industriels de décarbonation* », illustre Jean-Claude Garnier. Ces AMR séduisent également pour leur capacité à fermer le cycle du combustible. En valorisant les matières nucléaires sans emploi (uranium appauvri, combustibles nucléaires usés, voire déchets ultimes, selon les concepts de réacteur), ils pourraient résoudre la question de l'indépendance énergétique, et réduire celle des déchets. « *Les projections à l'horizon 2050 montrent une tension sur l'uranium issu des mines. À cette date, ces réacteurs de 4ème génération ont une viabilité économique. Et en France, dans cette optique de cycle fermé, nous disposons d'un stock de matière nucléaire de plus de 5 000 ans* », affirme Jérôme Garcin.



© L. Godart/CEA



Préparation pour l'analyse de micro-échantillons de combustible nucléaire irradié.

Signe de la pertinence de ces mini-centrales, l'engouement international qu'elles suscitent depuis une quinzaine d'années, notamment dans les pays anglo-saxons, en Chine, en Russie et au Japon.

Le coût de l'énergie, devenu en moins d'un an un facteur critique pour les industries énergivores, est depuis venu s'immiscer dans l'équation. « *La stabilité du coût de la ressource est indéniablement un argument fort en faveur du nucléaire, et bien davantage pour les AMR de 4ème génération*, observe Guillaume Ravel, en charge des accords stratégiques à la Direction des énergies. *Les industriels commencent à regarder les SMR non pas comme des éléments qui alimentent le réseau en électricité, mais pour en acquérir pour leurs propres besoins, adossés à leurs usines* ».

Voilà pourquoi les SMR et AMR pourraient bien s'imposer dans le mix énergétique, en complément des énergies renouvelables. Non seulement pour remplacer des petites centrales à charbon ou à gaz, mais aussi pour répondre à ces nouveaux besoins de chaleur décarbonée, allant jusqu'à la production d'hydrogène et de carburants de synthèse.

La France a des atouts

Signe de la pertinence de ces mini-centrales, l'engouement international qu'elles suscitent depuis une quinzaine d'années, notamment dans les pays anglo-saxons, en Chine, en Russie et au Japon. Pas moins de 70 concepts sont aujourd'hui à l'étude « *à des degrés de maturité et d'avancement inégaux* », précise cependant Jean-Claude Garnier. Ils sont portés à la fois par des exploitants historiques et des start-up – à l'image de Terra Power et de son fondateur Bill Gates qui a lancé le concept des AMR dans les années 2010 – et souvent soutenus par des financements importants. « *Dans la décennie 2010, le DOE, le Département de l'énergie américain, a investi plus de 1 milliard de dollars dans ces programmes.* »

Ce mouvement s'étend désormais en Europe. Le SMR Nuward™, auquel contribue le CEA, prépare son déploiement à partir de 2030 (voir page 22). Et l'appel à projets « réacteurs nucléaires innovants » de France 2030, ouvert du 2 mars 2022 au 28 juin 2023, a accéléré la R&D. Le CEA y jouera un rôle central d'expert, en accompagnant les start-up candidates (voir page 26).

Dans cette compétition internationale, Stéphane Sarrade se veut confiant : « *la vraie réponse pour être dans le bon temps, c'est de faire trois choses à la fois : développer le concept de réacteur ; être en capacité d'intégrer le licencing[3] ; et maîtriser le cycle du combustible (approvisionnement, enrichissement, transport, traitement et gestion des déchets). Les start-up aux États-Unis ont commencé il y a quinze ans et rencontrent des difficultés d'accès au combustible et à des ressources humaines compétentes. En France, nous avons commencé plus tard, mais nous disposons d'un socle plus important. Notre force, c'est d'être en capacité d'aborder ces trois sujets avec la même temporalité. C'est cela qui nous fera gagner du temps* ». ●

↑ Installation de test de corrosion en milieu gaz à haute température, notamment pour l'étude de nouveaux matériaux pour des échangeurs de chaleur de réacteurs du futur.

(2) À titre de comparaison, les puissances des réacteurs du parc électrique français sont de 900, 1300 et 1450 MWe pour les REP ; et de 1670 MWe pour un EPR2.

(3) Démonstration de la maîtrise de la sûreté d'un réacteur nucléaire, en vue de l'obtention d'une autorisation de l'autorité de sûreté pour le construire et l'exploiter.

Le nucléaire : mission décarbonation

Pour atteindre la neutralité carbone en 2050, toutes les énergies bas-carbone devront être mises à contribution. L'énergie nucléaire, qui a permis jusqu'ici d'éviter l'émission d'environ 70 gigatonnes de CO_2 à l'échelle mondiale, contribuera à ce mix énergétique, aux côtés des énergies renouvelables qui monteront en puissance. À partir de 2030, des petits réacteurs nucléaires viendront compléter ce paysage énergétique. Ils apporteront de nouveaux services, en fournissant non seulement de l'électricité, mais surtout de la chaleur locale pour les réseaux urbains et pour répondre aux immenses besoins de décarbonation des industries les plus énergivores.

© Morin Alexis

Salle des machines de l'EPR de Flamanville

© Colin Matthieu

1970

Les REP* (ou les REB*) produisent de l'électricité nucléaire

2022

Développement de nouveaux concepts de réacteurs et lancement de nouveaux projets de réacteurs nucléaires pour la production d'électricité et de chaleur

Depuis 1970, environ **70 Gt de CO_2** non émises dans le monde grâce à l'énergie nucléaire

C'est l'équivalent de 173 ans d'émissions nettes de gaz à effet en France (2019)

(Source : AIEA)

La consommation d'électricité représente environ **27 000 TWh** dans le monde (Ember), et **449 TWh** en France (RTE).

Le nucléaire représente :
environ **4 %** de la production d'énergie mondiale

environ **10 %** de la production d'électricité mondiale

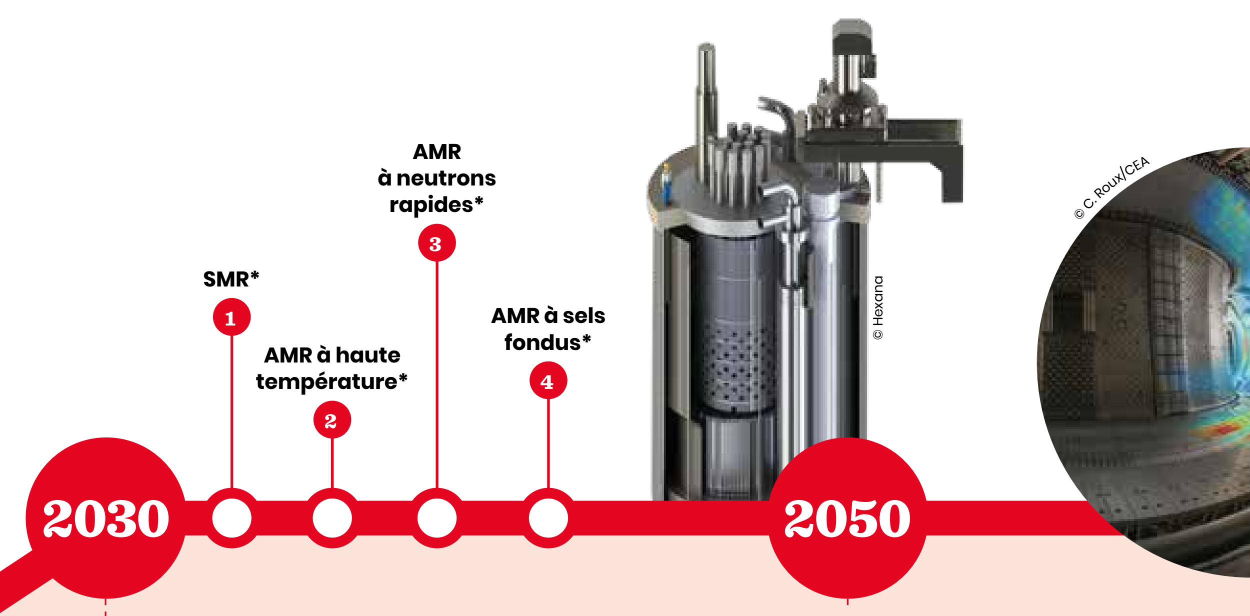
↗ **Demande d'électricité**

↗ **Efficacité et sobriété énergétiques**

↗ Décarbonation des industries énergivores (environ **30 000 TWh/an** sont nécessaires)

↗ **Énergies renouvelables**

↘ **Énergies fossiles**



Mise en production des SMR*, AMR* et des MMR* pour la fourniture d'électricité et de chaleur (cogénération)

OBJECTIF
70 pays engagés à atteindre
la neutralité carbone

Mise en production de réacteurs à fusion nucléaire

 **Énergies renouvelables**

Énergies fossiles

 **Efficacité et sobriété énergétiques**

La consommation d'électricité représentera environ **54 000 TWh** dans le monde (AIEA) et **645 TWh** en France (RTE).

OBJECTIF INTERMÉDIAIRE DE L'EUROPE
Fit for 55
(-55 % d'émissions nettes de CO_2 par rapport à 1990)

LEXIQUE

REP : réacteur à eau pressurisée de 2ème ou 3ème génération

REB : réacteur à eau bouillante

EPR : concept français de REP de 3ème génération

1 **SMR** : *small modular reactor*
C'est une technologie mature qui s'appuie sur celle des réacteurs à eau sous pression, majoritaire dans le monde. La plupart des SMR sont conçus pour fonctionner en cogénération : production d'électricité et/ou de chaleur (température maximale : 250 °C)

AMR : *advanced modular reactor* issu de technologies de 4ème génération

2 Un **AMR à haute température** est une technologie robuste et simple qui permet d'atteindre des températures très hautes (850 °C), choisie par près de la moitié des start-up dans le monde.

3 Les **AMR à neutrons rapides** exploitent une technologie de grande maturité. Plusieurs réacteurs à neutrons rapides ont déjà été construits dans le monde. Ils permettent de fournir de la chaleur jusqu'à environ 600 °C, et de l'électricité.

4 Les **AMR à sels fondus** sont des concepts de réacteurs à neutrons thermiques ou rapides disruptifs, bien qu'imaginés dans les années 1960. Ils rencontrent un grand succès auprès des investisseurs et des start-up. Des verrous sont encore à lever sur les matériaux (corrosion par les sels, notamment) et sur le cycle du combustible associé. Ils permettent de fournir de la chaleur jusqu'à environ 600 °C, et de l'électricité.

MMR : *micro modular reactor* (SMR ou AMR « miniatures »)

Nuward™, prêt à décoller

Nuward™ est le premier projet de petit réacteur modulaire (SMR) développé en France, associant les grands acteurs de la filière. 500 millions d'euros sont alloués par France 2030 pour le développement de l'avant-projet détaillé. Objectif : un prototype en 2030 pour le marché européen.

C'est quoi ?

Nuward™ est une petite centrale nucléaire de 340 MWe constituée de deux réacteurs de technologie REP (réacteur à eau pressurisée) de génération 3 immergés dans une piscine commune. Comme tous les SMR, le réacteur, au design simplifié, est conçu pour être compact, modulaire et fabriqué en série. Il répond à un haut niveau de sûreté et offre une meilleure résistance aux agressions externes grâce à une construction semi-enterrée.

Le projet a été lancé en 2019, à la suite d'une réflexion initiée en 2012, par un consortium EDF - CEA - Naval Group - TechnicAtome rejoint en 2021 par Framatome et l'entreprise européenne Tractebel Engie. La construction du premier réacteur est attendue pour 2030.

Pourquoi et pour qui ?

Nuward™ est un SMR essentiellement électrogène adapté à l'export, notamment pour remplacer des centrales thermiques. Sa conception permet aussi de fonctionner en cogénération pour produire de la chaleur : réseaux de chauffage urbain, production d'hydrogène, dessalement d'eau de mer, capture et valorisation du CO_2.

Le CEA travaille en particulier sur les configurations de couplage pour servir des besoins industriels, notamment avec des électrolyseurs à haute température pour la production d'hydrogène décarboné.

Quelle place dans une compétition mondiale ?

Plus de 50 projets de SMR sont en développement dans le monde, à des niveaux d'avancement très variables. Un des plus avancés est porté par Nuscale Power (États-Unis), la première société à avoir lancé le concept de SMR ; elle a récemment obtenu l'agrément de l'autorité de sûreté américaine. D'autres sociétés sont aussi en lice : GE-Hitachi (EU-Japon), Rolls Royce (Royaume-Uni), Westinghouse (EU), ainsi que des start-up canadiennes. La Chine développe à ce jour six modèles de SMR, dont un en construction. Les seuls SMR aujourd'hui en exploitation se trouvent en Russie (Rosatom), sous la forme de deux petits réacteurs installés en 2019 sur une barge pour alimenter des sites isolés du nord du pays.

En Europe, Nuward™ est de loin le projet le plus mature. Selon les experts, le concept des SMR reposant sur un effet de série, le premier modèle industrialisé, attendu vers 2030, pourrait s'imposer sur le marché.

LES BRIQUES TECHNOLOGIQUES APPORTÉES PAR LE CEA

- **La conception d'un nouveau design de générateur de vapeur**, plus compact
- **La conception neutronique du cœur** : design des assemblages combustibles ; stratégie de management des barres de contrôle qui permettent de réguler les réactions nucléaires ; première image numérique de référence du cœur ; gestion simplifiée du cœur en eau claire
- **Des études de thermohydraulique** (mécanique des fluides avec transferts de chaleur) pour optimiser la circulation du fluide dans le circuit primaire et les échanges de chaleur entre le combustible et le fluide
- **Sûreté** : intégration de systèmes passifs pour l'évacuation de la chaleur
- **Des codes de calcul développés** au CEA et adaptés à Nuward™ :
  - Apollo 3®, pour les calculs de neutronique
  - Cathare, pour les calculs de thermohydraulique sur l'ensemble du circuit du réacteur
- **Des plateformes d'essais :**
  - Beench pour simuler les conditions thermohydrauliques et chimiques des phénomènes d'encrassement du générateur de vapeur
  - Exocet pour l'amélioration des modèles physiques
  - Everest, en cours de construction, pour valider les systèmes de sûreté
  - Une boucle intégrale attendue en 2028, pour reproduire l'architecture du cœur à échelle réduite

« Nous avons apporté des éléments d'innovations fortes dans le design et sur les systèmes de sûreté, amené et adapté nos outils de calcul, réalisé la conception neutronique du cœur et conduit de nombreuses études de neutronique et de thermohydraulique.



Pierre Gavoille, chef du programme SMR au CEA


© L. Godart/CEA

Pierre Gavoille
Chef du programme SMR au CEA

Nuward™, *l'ambition européenne*

À travers l'Europe, de plus en plus d'États ont manifesté un intérêt pour se doter d'un SMR. Dans un paysage fortement concurrentiel, l'élaboration d'une offre industrielle compétitive européenne est cruciale. Avec pour candidat le modèle français Nuward™.


© L. Godart/CEA

Bertrand Bouchet
Représentant du CEA auprès de l'Union européenne

La stratégie

Bertrand Bouchet —— Nous discutons avec nos partenaires de l'UE, États, industriels, organismes de recherche, pour réfléchir ensemble à la construction d'une offre européenne incluant une technologie, en l'occurrence celle de Nuward™ – la seule assez mature pour arriver sur le marché à court terme –, une *supply chain* adaptée, c'est-à-dire toute la chaîne d'industriels, et des processus de coordination, y compris entre autorités de sûreté.

Pierre Gavoille —— Nous sommes sur des échéances de temps très courtes. Les premiers déploiements se feront autour de 2030. Il est donc crucial, pour des questions de compétitivité et de souveraineté, de mobiliser le plus d'acteurs industriels possibles pour être à l'heure à ce rendez-vous.

Bertrand Bouchet —— Il y a deux approches différentes au sein de l'Europe : celle d'un projet de SMR européen, incarné par Nuward™, avec sa *supply chain*, et celle d'un projet de SMR en Europe, avec des *supply chains* locales qui permettraient à un pays de produire sur son territoire les modules d'un SMR, quel qu'il soit, et il pourrait être américain. La stratégie française consiste à construire des partenariats avec des industriels européens autour de Nuward™ et de sa *supply chain* pour privilégier la première option.

Une concurrence intense

Pierre Gavoille —— Les pays anglo-saxons sont très offensifs pour implanter leur technologie sur le sol européen. Nous avons vu une démarche coordonnée de l'Agence américaine pour le commerce et le développement auprès de différents pays pour promouvoir les vendeurs américains, via des accords commerciaux, des contacts auprès des acteurs de la *supply chain*, une offre de formation… Avec de surcroît un avantage concurrentiel, celui du soutien financier massif de l'*Inflation reduction act*. Les Anglais de Rolls Royce, tout

comme GE-Hitachi, ont eux aussi engagé de nombreux contacts commerciaux.

L'action institutionnelle

Bertrand Bouchet —— Nous menons de front une double action, institutionnelle et industrielle. Un pré-partenariat européen s'est mis en place depuis plus d'un an à l'initiative du CEA et d'EDF en lien avec les autorités françaises, pour rassembler un certain nombre d'acteurs autour de la problématique des SMR. C'est un processus soutenu par la Commission européenne. Cinq sujets critiques y sont instruits : l'analyse du marché ; les autorisations d'exploitation délivrées par les autorités de sûreté (le *licencing*) ; le financement et la gouvernance d'une alliance ou d'un partenariat européen ; la construction de la *supply chain* ; la R&D sur le court et le long terme, pour accompagner le déploiement de Nuward™ à partir de 2030, puis celui des AMR. Cette réflexion a abouti à de premières concrétisations : une déclaration le 4 avril de la commissaire Mariya Gabriel sur le rôle de la recherche et de la formation ; et la sollicitation de la Commission par dix ministres en vue de l'organisation d'une réunion des parties prenantes sur les SMR. Cet évènement pourrait être le point de départ d'un partenariat ou d'une alliance européenne.



Un pré-partenariat européen s'est mis en place depuis plus d'un an à l'initiative du CEA et d'EDF en lien avec les autorités françaises, pour rassembler un certain nombre d'acteurs autour de la problématique des SMR. »

Bertrand Bouchet





Avec le SMR, le secteur nucléaire passe d'une industrie de construction sur site à une industrie manufacturière qui devra fabriquer en usine et en série des petits modules avec des systèmes pré-équipés. »

Pierre Gavoille

L'action industrielle

Pierre Gavoille —— Avec le SMR, le secteur nucléaire passe d'une industrie de construction sur site à une industrie manufacturière qui devra fabriquer en usine et en série des petits modules avec des systèmes pré-équipés. À cela, deux conséquences : le besoin d'adapter la *supply chain* et l'entrée de nouveaux acteurs industriels. Il est vraisemblable que la fabrication des éléments du cœur, tout comme la question des combustibles et de leur cycle, seront confiés aux acteurs français, déjà hautement spécialisés et expérimentés. Mais pour tous les systèmes périphériques et leur pré-assemblage (générateurs de vapeur, pompes, tuyauteries…), nous cherchons à solliciter le plus possible les industriels européens. La construction par modules, avec des éléments de taille réduite, impliquera également de nouveaux acteurs du génie civil, plus classiques et bien plus nombreux que ceux habituellement engagés dans les chantiers des réacteurs de puissance. Enfin, les stratégies de décarbonation pour la fourniture de chaleur, d'hydrogène ou de produits chimiques, mobiliseront encore d'autres intervenants.

Les premiers accords

Pierre Gavoille —— Nous avons déjà des contacts commerciaux en Pologne, où Respect Energy a signé des accords exclusifs avec Nuward™, et en Finlande. D'autres pays, Estonie, Suède, République tchèque, ont exprimé un intérêt fort pour le SMR français. Ceux-là sont évidemment pressentis pour contribuer à la *supply chain*, mais pas seulement. Nous avons notamment approché des industriels italiens. Tractebel Engie, entré dans le consortium Nuward™, facilitera aussi cette dimension européenne. Enfin, citons l'Inab, l'*International Nuward Advisory Board*. Il s'agit d'un groupe d'instituts et d'industriels à l'échelle internationale qui conseille l'équipe de Nuward™ sur son développement, le design, les performances, la sûreté, de manière à préparer le déploiement à l'international. Ce sont aussi des vecteurs de discussions avec les acteurs industriels.

Accélérer le licencing

Pierre Gavoille —— La crédibilité d'une nouvelle offre de réacteurs est liée à l'obtention de sa certification auprès de l'autorité de sûreté du pays d'implantation. Nous voulons accélérer ces processus. C'est pourquoi Nuward™ a lancé la *Joint Early Review*. C'est un point fort assez novateur, qui distingue Nuward™ de ses concurrents. Trois autorités de sûreté différentes, France, Finlande et République tchèque, travaillent ensemble pour réaliser la première analyse de sûreté et aboutir à une précertification. Aujourd'hui, l'initiative s'élargit, avec les Suédois qui souhaitent rejoindre le groupe. Bien entendu, les autorités de sûreté des différents pays resteront souveraines dans leurs homologations nationales.

Anticiper l'arrivée des AMR

Bertrand Bouchet —— Nous devons aussi dès à présent anticiper la deuxième vague de réacteurs modulaires qui arrivera sur le marché, celle des AMR, avec un cycle du combustible différent, des systèmes différents et donc une *supply chain* qui devra s'adapter. Le marché potentiel à venir est énorme. ●

Coach de start-up

Les sociétés lauréates à l'appel à projets « réacteurs nucléaires innovants » de France 2030 pourront être coachées par le CEA, qui leur apportera son expertise technique en R&D nucléaire, ainsi que sa longue expérience de maturation de projets innovants. À la clé, l'émergence de nouvelles filières industrielles au service de la décarbonation.

« *Une start-up dans le nucléaire, cela ne ressemble pas du tout aux start-up que l'on connaît, tout est démultiplié !* », souligne Jérôme Garcin. Plus de budget, de ressources humaines, de temps de développement et de maturation, et la spécificité particulière de la sûreté et de la sécurité des concepts qu'il faudra démontrer auprès de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et des services du Haut fonctionnaire de défense et de sécurité (HFDS). Et pour envisager l'export de ces technologies, l'exercice devra être répété dans chacun des pays visés !

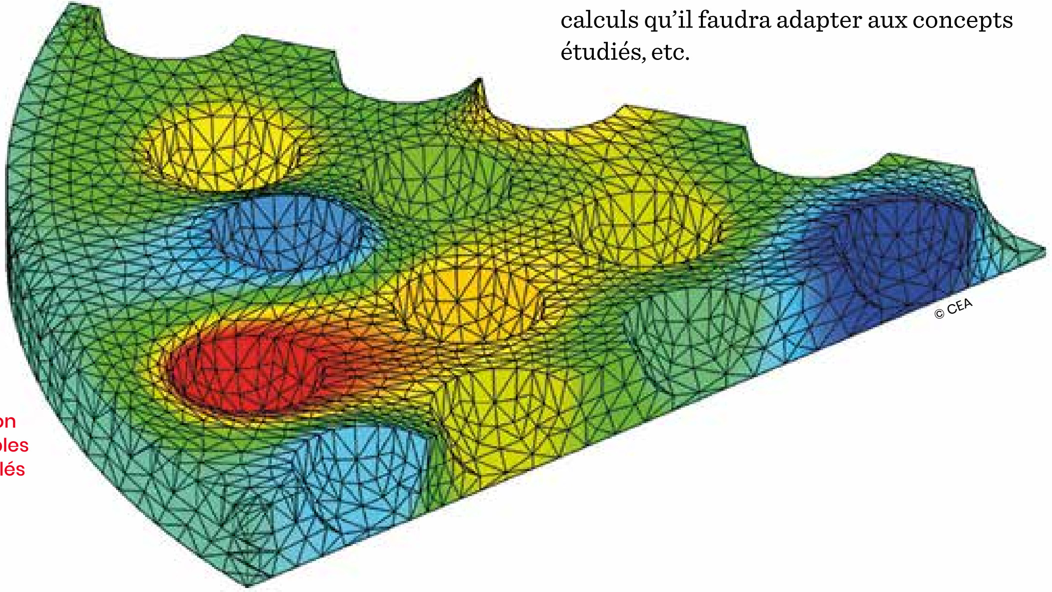
C'est pourquoi le programme France 2030 a d'emblée demandé au CEA d'accompagner, si elles le souhaitent, les start-up candidates à l'appel à projets « réacteurs nucléaires innovants » (AAP) pour accélérer leur maturation. Il est vrai que l'organisme a tous les atouts et l'expérience pour endosser ce rôle : une culture en R&D nucléaire unique en France et une culture de l'innovation et de l'essaimage de start-up, allant jusqu'à la contribution à la structuration de filières industrielles souveraines (STMicroelectronics, Cogema, et plus récemment Genvia pour la production d'hydrogène).

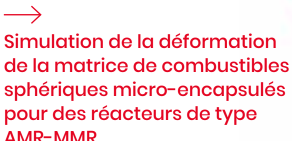
Accompagner jusqu'à l'avant-projet détaillé

Au CEA, c'est donc une nouvelle aventure qui démarre. Comme le résume Stéphane Sarrade, « *les start-up dans le nucléaire, c'est totalement nouveau en France, et c'est enthousiasmant ! L'exercice a démarré en 2022. Nous avons rencontré une dizaine de candidats et start-up dans les domaines de la fission et de la fusion. Nous les avons challengés sur la réalité technologique de leurs propositions, la temporalité annoncée et leurs besoins techniques. Il était important aussi de les amener dans une acculturation du monde nucléaire, par exemple sur les enjeux de sûreté et le niveau d'exigence attendu dans ce domaine, et sur le cycle du combustible nucléaire* ». Ceci pour aider les porteurs à rédiger et présenter des dossiers de haute qualité lors de la phase de sélection de l'AAP.

Pendant les deux années qui viennent, le CEA fournira toute son expertise scientifique et technique aux start-up lauréates pour les mener à un niveau pré-APS (avant-projet sommaire) : aide à la conception, mise à disposition de données expérimentales et de codes de calculs qu'il faudra adapter aux concepts étudiés, etc.

(1) Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.





Simulation de la déformation de la matrice de combustibles sphériques micro-encapsulés pour des réacteurs de type AMR-MMR.

© A. Aubert/CEA

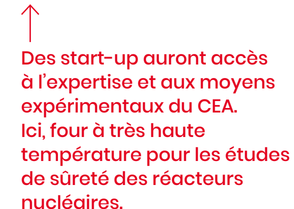
Suivra une montée en puissance de l'accompagnement pour atteindre les phases de preuve de concept, avec la mise en place d'expériences, voire la conception et la construction de nouvelles installations. « *Une étape qui nécessitera de renforcer les compétences et les moyens expérimentaux au CEA* », estime Jean-Claude Garnier. Et à partir de 2026, le meilleur projet retenu par Bpifrance, l'opérateur de l'AAP, recevra une enveloppe pouvant aller jusqu'à 300 millions d'euros. De quoi lui permettre de produire un avant-projet détaillé, avec une démonstration via un prototype. À charge pour la société de compléter par des financements privés, ainsi que le modèle l'exige.

Combustible et sûreté, deux paramètres clés

Les start-up candidates proposent des concepts variés et à des stades de maturité technologique très différents. « *Les plus nombreuses ont choisi la fission nucléaire, en version SMR ou AMR, dans des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium ou au plomb, à haute température ou à sels fondus. D'autres ont opté pour des réacteurs à fusion*, avance Jean-Claude Garnier. *Pratiquement tous les projets proposent de la chaleur pour des besoins industriels énergivores ou de chauffage urbain, dans des gammes de température s'échelonnant entre 50 et 600 °C, et de l'électricité locale décarbonée* ».

« *Notre mission est de leur faire gagner du temps* », résume Jean-Claude Garnier. Par exemple en les sensibilisant aux deux paramètres clés que sont le combustible et le *licencing*, c'est-à-dire toute la démarche menant à la démonstration de la sûreté du réacteur, de sorte d'obtenir l'agrément de l'autorité de sûreté pour le construire et l'exploiter. « *En France, nous avons des lois, des arrêtés, des guides édités par l'ASN ou l'IRSN*[1]. *Ces start-up doivent apprendre à fonctionner avec cette réglementation et ces dossiers techniques qui sont complexes* », ajoute-t-il. Les études de sûreté reposent en outre sur des outils de calcul, validés avec des expérimentations représentatives, sur des installations qui ne sont pas forcément disponibles aujourd'hui, et sur une simulation intégrale du fonctionnement du réacteur. Pierre Gavoille le souligne : « *Faire du licencing pour un concept de réacteur à eau pressurisée, par exemple pour un SMR, nous le maîtrisons bien. Pour des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, nous avons déjà des données pertinentes acquises via les programmes passés et les collaborations, même si elles sont plus limitées. Sur des concepts à sels fondus avec un combustible liquide, c'est plus novateur, cela nécessitera un travail de R&D plus important sur le plan expérimental* ».

Enfin, les combustibles, en particulier ceux très spécifiques des AMR de 4ème génération, demanderont à testés, qualifiés, validés. Et leurs capacités industrielles de production, pour tout le cycle du combustible, sont encore à construire.



Des start-up auront accès à l'expertise et aux moyens expérimentaux du CEA. Ici, four à très haute température pour les études de sûreté des réacteurs nucléaires.



Il est important d'amener les start-up dans une acculturation du monde nucléaire. »

Stéphane Sarrade, directeur des programmes énergies du CEA

Start-up essaimées du CEA

Février 2022, le CEA pousse ses équipes à la créativité pour « *imaginer de nouveaux concepts de réacteurs nucléaires portés par des start-up, afin de répondre aux objectifs de neutralité carbone en 2050* ». De cette réflexion sont nées cinq start-up s'appuyant sur des technologies et brevets de l'organisme. Présentation de deux d'entre elles : Hexana et Stellaria, candidates à l'appel à projets « Réacteurs nucléaires innovants » de France 2030.

Toutes deux proposent des petits réacteurs de type AMR qui fournissent de la chaleur (jusqu'à 500-600 °C) et de l'électricité, à la fois pour l'industrie lourde, mais aussi pour servir tous les nouveaux besoins liés à la décarbonation (production d'hydrogène, chaleur urbaine, etc.) ; et répondent aux impératifs de souveraineté par leur capacité à fermer le cycle du combustible nucléaire.

Hexana

hexana.fr

TECHNOLOGIE

Réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium

Hexana s'appuie sur un important socle de connaissances acquis depuis des décennies par le CEA et ses partenaires industriels : brevets, retours d'expérience sur les réacteurs expérimentaux, outils et matériaux qualifiés, données expérimentales, savoir-faire, personnels compétents.

INNOVATION

Système constitué de deux réacteurs de 150 MW électrique (ou 400 MW thermique), alimentant une unité de stockage thermique via des réservoirs de sels fondus. Ces réservoirs permettent de fournir à la demande, soit de la chaleur, soit de l'électricité, avec une grande flexibilité.

COMBUSTIBLES

Uranium appauvri et combustibles usés des REP (MOx).

SÛRETÉ

Passive (absence de pression, refroidissement par convection naturelle).

PARTENAIRES

CEA, Framatome, EDF. Discussion avec d'autres acteurs en cours.

CALENDRIER

Première mise en service envisagée en 2035, précédée par la construction d'un démonstrateur.

Hexana n'est pas Astrid

Le réacteur d'Hexana est un objet complètement différent de celui du projet Astrid. Ce dernier préfigurait ce qu'aurait pu être un réacteur de puissance uniquement destiné à la fourniture d'électricité. Hexana est en revanche conçu pour de la cogénération. En bénéficiant de tous les acquis du CEA et de ses partenaires industriels sur les RNR, la start-up devrait gagner cinq à dix ans d'études préalables.



© L. Godart/CEA

Guillaume Campioni

Lucas Tardieu

Nicolas Breyton

Stellaria

stellaria-energy.com

TECHNOLOGIE

Réacteur à sels fondus chlorure

Bien qu'imaginés dans les années 1960, les réacteurs à sels fondus sont des concepts plus disruptifs et à faible niveau de maturité, mais très prometteurs du fait de leurs atouts : grande polyvalence en matière de combustibles, facilité de mise en œuvre et sûreté simplifiée du fait d'un combustible liquide (sous forme de sels fondus), compacité, capacité à brûler les actinides mineurs (américium) in situ et en continu. Des verrous restent encore à lever sur les matériaux (corrosion par les sels, notamment) et la preuve de concept doit être démontrée.

INNOVATION

Système ultracompact (4 m^3), fonctionnant en autonomie pendant cinq ans grâce à un concept de cuve amovible. Cette stratégie permet de s'affranchir des problèmes d'usure des matériaux, notamment la corrosion provoquée par le sel. Puissance : 100 MWe (ou 250 MWth).

COMBUSTIBLES

Grande polyvalence : uranium, naturel et appauvri, plutonium, MOx, actinides mineurs.

SÛRETÉ

Passive (absence de pression, refroidissement par convection naturelle, autostabilisation du cœur).

PARTENAIRES

CEA, Schneider Electric. Discussion avec d'autres acteurs en cours.

CALENDRIER

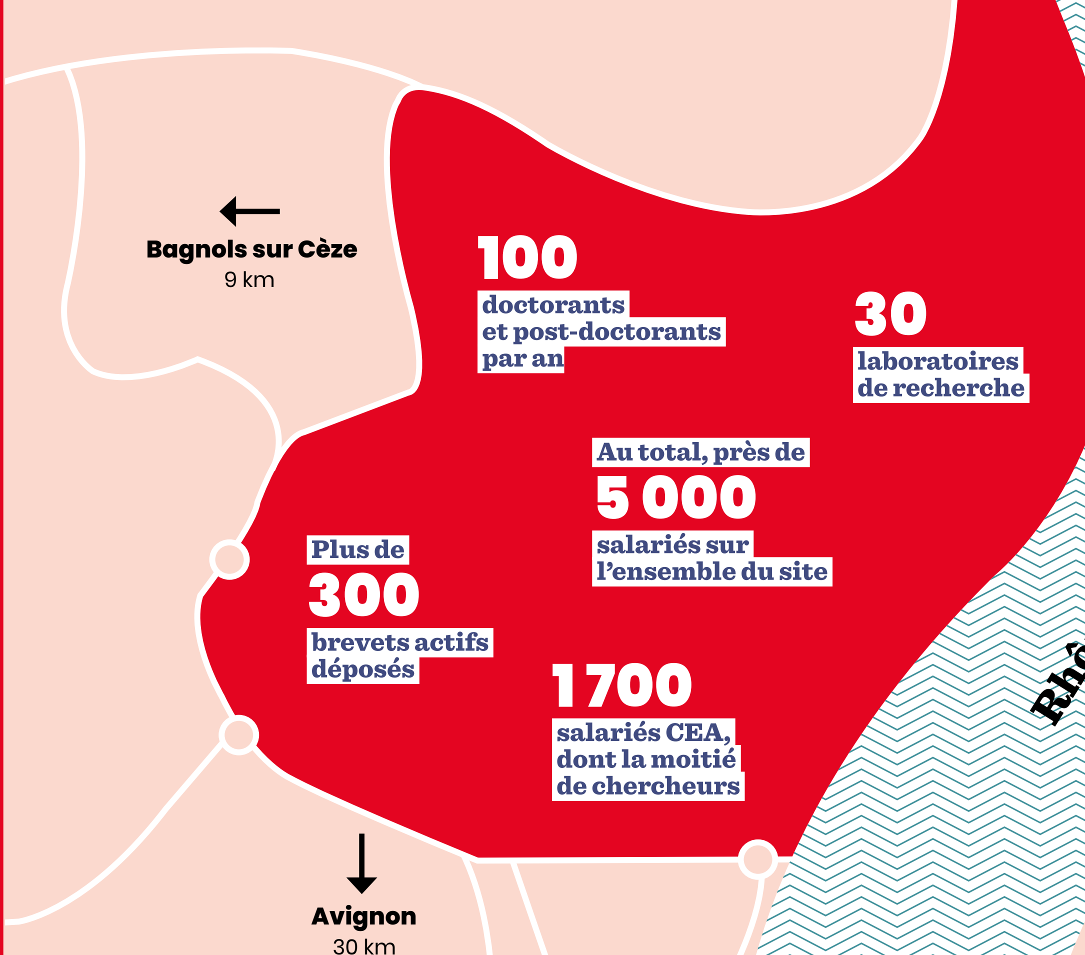
Première mise en service envisagée vers 2040, précédée par la construction d'un démonstrateur.



Revivez le DÉMO DAY FAST du 24 mai 2023

Le CEA à... Marcoule

Le CEA compte dix centres répartis dans toute la France, de l'Aquitaine à la Bourgogne. Ces ancrages territoriaux lui permettent d'être un moteur pour l'innovation et l'économie dans de nombreux bassins d'emploi, au plus proche des acteurs locaux.
Première étape à Marcoule, un centre mobilisé pour l'économie circulaire et les énergies propres.



10 % du PIB industriel de la région Occitanie

Les principales activités du centre

Un rôle clé pour le cycle nucléaire :

→ assainissement-démantèlement
→ R&D recyclage des combustibles actuels et futurs
→ R&D combustibles du futur
→ R&D conditionnement et gestion durable des déchets

Des innovations pour l'économie circulaire des énergies bas carbone :

→ récupération et revalorisation des matières et matériaux critiques
→ approche intégrée des procédés

Un éclairage pour la santé de demain :

→ compréhension et surveillance des maladies émergentes
→ diagnostics innovants

Les principaux partenaires économiques

Des entreprises implantées directement sur le site :

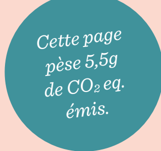
→ Orano Melox (recyclage et combustible MOx)
→ Cyclife (démantèlement et gestion des déchets)
→ Stéris (stérilisation industrielle)
→ Cisbio Bioassays (diagnostic médical)

Des multinationales, comme EDF (pour le soutien nucléaire), Faurecia (pour le recyclage polymères), Stellantis (pour le recyclage composites), Engie (pour la production d'hydrogène), NavalGroup, Safran, Owens Corning et bien d'autres.

Des entreprises nationales et locales, comme Phylogene (analyse génomique et protéomique), SDTech (procédés de broyage), ou encore Ng-Biotech et VedaLab (diagnostics biologiques rapides).

Des entreprises cofondées ou essaimées par le CEA, comme Genvia (co-créée avec Schlumberger), et Extracthive, une start-up spécialisée dans la valorisation des déchets industriels.

2e
bassin industriel de la région Occitanie, derrière le pôle aéronautique de Toulouse





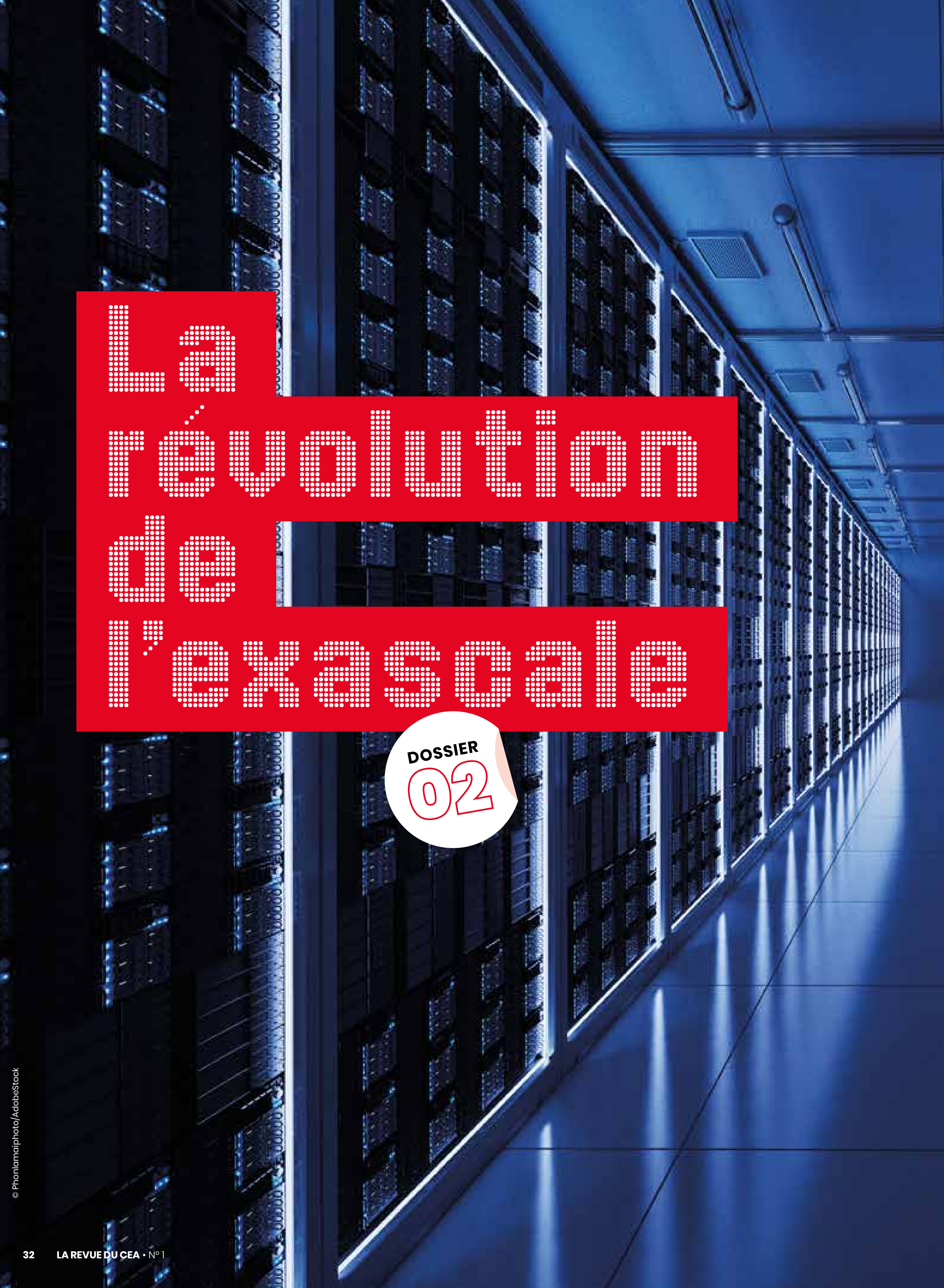
Les principaux partenaires académiques

Le centre de Marcoule collabore avec plusieurs **établissements d'enseignement supérieur** : l'école des Mines Télécom IMT Alès, l'école nationale supérieure de chimie de Montpellier, avec notamment l'Institut de chimie séparative de Marcoule, et de multiples universités (Montpellier, Nîmes, Grenoble, Valence, Paris-Saclay, Lorraine, Strasbourg et Lille).

À l'international, le centre a noué des collaborations en Allemagne, au Royaume-Uni, en Suède, en Australie, à Singapour et au Japon. Aux États-Unis, Marcoule travaille notamment en lien avec l'université de Stanford, le MIT, et les laboratoires de Los Alamos et de Oak Ridge.

Les principaux partenaires institutionnels et de recherche

Le CEA Marcoule est cofondateur de la CleanTech Valley, une association qui pilote le contrat de transition énergétique et accompagne les start-up dans le domaine de la cleantech.
Le centre a signé une convention en septembre dernier avec le CHU de Nîmes, ainsi que des partenariats avec le BRGM, l'Ifpen, le Cirad ou encore l'Inrae.



La révolution de l'exascale

DOSSIER 02



Le mot de...

Sylvie Retailleau
Ministre de l'Enseignement supérieur et de la recherche

© MESR/XRPictures

« Climat, transition énergétique, santé, intelligence artificielle, industrie : le calcul haute performance est au cœur des grands défis économiques et sociétaux. Mais pour y répondre, des systèmes de plus en plus complexes, capables de traiter de plus grands volumes de données, sont indispensables : c'est la technologie exascale.

Le **saut générationnel vers l'exascale** est nécessaire pour la recherche, afin de mieux décrypter les problèmes de science fondamentale. Il est aussi nécessaire pour l'industrie, qui doit rester compétitive en réduisant les coûts des cycles d'innovation. Enfin, ce saut est essentiel pour nous tous, qu'il s'agisse de son application pour le climat ou en santé, pour modéliser par exemple des phénomènes extrêmes ou identifier de futurs médicaments.

Le calcul haute performance est **une filière technologique d'excellence française**. Le Gouvernement se mobilise dans le cadre de France 2030 et de la Loi de programmation de la recherche pour qu'elle le reste.

L'exascale est une opportunité unique de favoriser la souveraineté française et européenne dans les domaines scientifique, technologique et économique par la convergence de simulations numériques à grande échelle, l'analyse de données massives et l'intelligence artificielle. C'est un accélérateur pour la science et l'innovation, en France comme en Europe. »

Propos extraits du dossier de presse « France 2030 : le Gouvernement investit plus de 40 millions d'euros dans le programme de recherche NumPEx pour doter la France d'un supercalculateur exascale et des technologies souveraines associées », daté du 24 février 2023.

Aux origines du CALCUL

LE SAVIEZ-VOUS ?
À l'origine du calcul, il y a un caillou romain ! C'est parce que nos ancêtres comptaient avec des (petits) cailloux (*calculus* en latin) que nous parlons aujourd'hui de calcul. Calcul a conservé son acception originale en médecine où il désigne toujours un « caillou », une masse minérale qui peut notamment se former dans les voies urinaires (calculs rénaux) ou biliaires (calculs biliaires).

2022
Frontier (USA)
EXAFLOP/S
1 milliard de milliards
d'opérations à la seconde
→ *Ce qui reviendrait à lire 1 000 milliards de livres en une seule seconde*

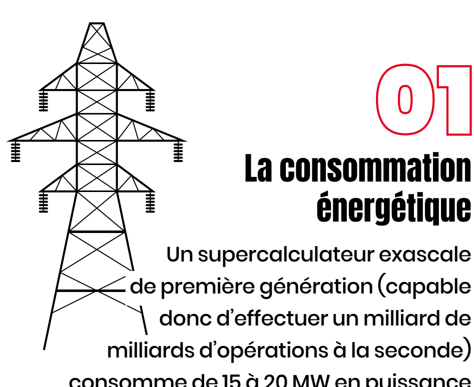
2008
Roadrunner (USA)
PETAFLOP/S
1 million de milliards
d'opérations à la seconde
→ *Ce qui reviendrait à lire un milliard de livres en une seule seconde*

1997
ASCI Red (USA)
TERAFLOP/S
1000 milliards
d'opérations à la seconde
→ *Ce qui reviendrait à lire un million de livres en une seule seconde*

1985
Cray2 (USA)
GIGAFLOP/S
1 milliard
d'opérations à la seconde
→ *Ce qui reviendrait à lire mille livres en une seule seconde*

1964
Control Data 6600 (USA)
MEGAFLOP/S
1 million
d'opérations à la seconde
→ *Ce qui reviendrait à lire 1 livre en une seule seconde*

Cinq grands enjeux de l'exascale





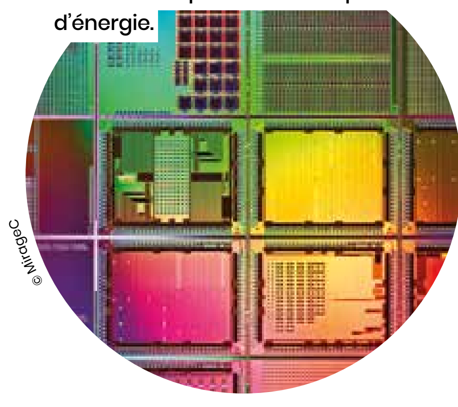
La consommation énergétique

Un supercalculateur exascale de première génération (capable donc d'effectuer un milliard de milliards d'opérations à la seconde) consomme de 15 à 20 MW en puissance maximale instantanée, ce qui nécessite d'optimiser le fonctionnement du centre de calcul, en matière d'efficacité énergétique.

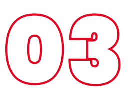


L'architecture du supercalculateur

Un supercalculateur exascale comporte des dizaines de milliers de processeurs, dont une grande part d'accélérateurs - typiquement des cartes graphiques (ou GPU) développées à l'origine pour les jeux vidéo et la visualisation 3D. Moins généralistes que les processeurs scalaires dits CPU, les GPU peuvent, quand ils sont bien programmés, effectuer davantage de calculs à la seconde pour la même quantité d'énergie.



© MirageC



Les usages

Les besoins scientifiques en précision, réalisme et rapidité dans la modélisation et la simulation des phénomènes sont le moteur de l'exascale. Mais les applications devront s'adapter, de façon pérenne, à l'utilisation massive de GPU. Or, aujourd'hui, il n'y a pas de portage standard efficace mais des adaptations pour un usage spécifique sur un supercalculateur donné.

© phonlamaiphoto/AdobeStock



L'ère du continuum numérique

Un calculateur exascale fera partie d'une large datasphère en pleine expansion, le continuum numérique. Celui-ci s'étendra des instruments (edge, « à la périphérie ») aux systèmes de calcul intensif. L'enjeu majeur sera la mise en œuvre de solutions pour la gestion efficace de flux de données à grande échelle, combinant traitement de données massives (HPDA), IA et calcul haute performance, tout en prenant en compte la gouvernance de la fédération des ressources, la cybersécurité, l'énergie et la durabilité.



Le traitement des données et l'IA



© foto_don-Fotolia

Le traitement de données massives nécessite désormais des puissances et des algorithmes qui font appel à l'intelligence artificielle (IA). Ces données massives peuvent provenir de grands instruments expérimentaux ou résulter de simulations numériques de plus en plus complexes.

La France et l'Europe *ont-elles une carte à jouer ?*

Simulation numérique et puissance de calcul ont un destin et une histoire communes sur fond de course à la puissance. Les besoins sans cesse croissants en précision, réalisme et rapidité dans la modélisation des phénomènes ont entraîné une demande exponentielle de puissance de calcul et de traitement de données.

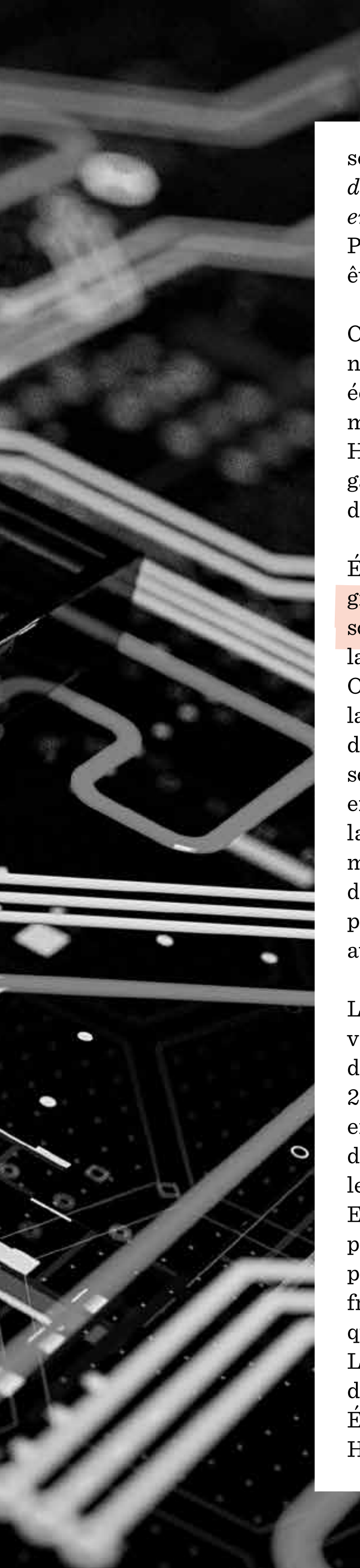
De la prévision météorologique à la compréhension des phénomènes en jeu dans le changement climatique actuel, en passant par l'évaluation d'un risque sismique ou le test de nouveaux traitements médicaux, de nombreux domaines utilisent aujourd'hui ce qu'on appelle le calcul haute performance (ou HPC pour *High Performance Computing*).

Depuis plus de dix ans, le domaine est en profonde mutation. Les usages scientifiques et industriels de la simulation et du HPC se sont considérablement diversifiés, le besoin de puissance s'est accru et étendu au traitement de données. Le *Big Data* puis l'apprentissage machine (notamment le *Deep Learning*) ont à la fois profité de la puissance du HPC et stimulé la demande de calculs, de traitement et de stockage des données toujours plus performants.

« *On peut caractériser le HPC comme d'une part un ensemble générique de techniques et méthodes, utilisant des moyens denses de calcul et de traitement en parallèle ; d'autre part le développement d'algorithmes, méthodes numériques et applications adaptés, pour répondre aux enjeux scientifiques et industriels de modélisation* », explique Jean-Philippe Nominé, chargé de mission au Département des sciences de la simulation et de l'information (DSSI) du CEA. Un supercalculateur n'est plus seulement une grande machine énergivore, mais un élément d'un ensemble de ressources combinées au sein de grandes infrastructures numériques. Le tout au service d'applications scientifiques et industrielles mêlant simulation numérique, traitement de données et intelligence artificielle : « *Il s'agit de faire progresser les connaissances, d'aborder et de résoudre de grands problèmes sociétaux, par exemple dans les domaines de la santé, du climat ou de l'énergie, enfin d'améliorer les processus industriels et la production de biens et de services. Ce sont des enjeux stratégiques* », précise Christophe Calvin, adjoint à la directrice de la recherche fondamentale au CEA.

La course à l'exascale

Cette multiplicité de besoins exige une utilisation optimisée des moyens de calcul haute performance. Et c'est ce qu'on attend de l'exascale, soit des supercalculateurs capables d'effectuer au moins un milliard de milliards d'opérations à la seconde. De véritables « concentrateurs de puissance » qui permettront de rester en pointe dans la compétition



scientifique et industrielle mondiale. « *Nous devons disposer du bon instrument pour être entendus dans l'orchestre* », souligne Jean-Philippe Nominé. Autrement dit, mieux vaut être un premier violon qu'un simple triangle.

Ces instruments de pointe sont une condition nécessaire à la compétitivité scientifique et économique des pays. La maîtrise d'un maximum des maillons de la chaîne de valeur du HPC (de la technologie aux applications) garantit l'indépendance des États vis-à-vis de leurs concurrents.

États-Unis, Chine, Japon… Toutes les grandes puissances historiques du HPC se sont lancées dans la course à l'exascale. Et c'est la machine américaine Frontier, exploitée au Oak Ridge National Laboratory, qui a franchi la première la barre du milliard de milliards d'opérations à la seconde, en juin 2022. Elle reste encore à ce jour non seulement la plus puissante mais également la seule exascale recensée dans le classement des 500 plus puissants supercalculateurs au monde (Top500).

L'Europe vise d'ici trois ans deux systèmes exascale dont le premier sera installé en Allemagne en 2024.

L'Europe n'est pas en reste. Elle vise d'ici trois ans deux systèmes exascale, dont le premier sera installé en Allemagne en 2024. La France (avec les Pays-Bas) a répondu, en février dernier, à l'appel à manifestation d'intérêt lancé par EuroHPC pour accueillir le deuxième à l'horizon 2025 : c'est le projet Exascale français, baptisé Jules Verne et porté par Genci, qui mettra à disposition des équipements et services HPC pour la recherche française et européenne, avec le CEA en tant que site d'accueil.
La compétition entre constructeurs occidentaux est rude, et aujourd'hui, seuls les États-Unis et l'Europe, respectivement avec HPE et Eviden (Bull-Atos), sont en mesure de rivaliser à l'échelle des meilleures machines mondiales. Les logiciels et les applications permettant d'exploiter efficacement ces instruments de pointe font souvent l'objet de collaborations internationales plus ouvertes, même si l'objectif demeure une souveraineté d'usage et la maîtrise de nos applications.

Le CEA, un acteur majeur du HPC

Acteur historique du calcul scientifique et du HPC, « *le CEA dispose d'une double expertise qui fait toute sa force*, rappelle Jacques-Charles Lafoucrière, chef du programme Numérique intensif au CEA. *D'une part, dans la mise en œuvre de grandes infrastructures et de calculateurs, historiquement liée à sa mission Défense et regroupés au sein du complexe de calcul scientifique de Bruyères-le-Châtel. D'autre part dans le développement, la production et l'intégration de logiciels et de technologies utiles au numérique* ». Il couvre ainsi l'ensemble de la chaîne du HPC : algorithmique, informatique, ingénierie de grandes infrastructures, conception et exploitation d'applications.

Pour rester au meilleur niveau, le CEA a développé une stratégie de collaborations académiques et industrielles, à l'échelle nationale, européenne et internationale. Au niveau mondial, il entretient des contacts structurés avec le *Department of Energy* américain et l'institut de recherches Riken au Japon. En Europe, ses équipes sont activement impliquées dans l'initiative Prace (*Partnership for Advanced Computing in Europe*) depuis 2010 et l'entreprise commune EuroHPC depuis 2018. Enfin, le centre de recherche allemand

de Juelich est un partenaire privilégié sur différents axes, au travers notamment de l'institut de recherche commun Aidas sur les sciences de la simulation. En France, le CEA mène, depuis plus de quinze ans, une collaboration avec Bull-Atos pour la coconception de supercalculateurs, ainsi qu'avec près de vingt partenaires privés qui cofinancent le Centre de calcul recherche et technologie (CCRT) et son supercalculateur dédié aux usages industriels du HPC.

Exascale, l'ultime frontière ?

Si les technologies de base existent déjà pour lancer l'essentiel de la révolution exascale, elles évoluent encore. L'optimisation et l'intégration à grande échelle des supercalculateurs sont à améliorer en permanence. Les nouveaux usages liés aux domaines scientifiques et industriels combinent désormais calculs et traitement de données. Soit de nouvelles contraintes pour les supercalculateurs qui doivent s'intégrer pleinement dans le continuum numérique « *from edge to cloud* » (du traitement en périphérie au traitement en nuage) pour gérer et stocker les données qu'ils produisent ou qu'ils reçoivent. Différents projets européens, menés dans le cadre d'EuroHPC, soutiennent les efforts dans ce sens.

Utiliser efficacement un supercalculateur de cette gamme réclame un gros travail d'adaptation, de portage et de réécriture des codes de calcul. En cause ? La nature majoritairement accélérée de son architecture et un passage à l'échelle sans précédent. De nouveaux modèles de calcul, comme ceux utilisés en analyse de données à haute performance et en IA (*Machine Learning* et *Deep Learning*), devront également être pris en compte. Le couplage HPC et analyse de données devient nécessaire pour mener à bien des simulations complexes en vraie grandeur, sous contrainte de temps de calcul et de volume de stockage. Un travail sur l'accompagnement des équipes s'avère indispensable, depuis la chaîne de développement jusqu'à la formation.

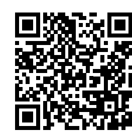
Différentes initiatives sont engagées en France pour aider les communautés scientifiques à franchir le cap des usages à l'échelle, comme le moonshot CExA du CEA (voir encadré).

Parmi les plus emblématiques au niveau national, le Programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) NumPEx financé par le Gouvernement à hauteur de 40,8 millions d'euros sur six ans dans le cadre de France 2030. Son objectif : développer des solutions logicielles essentielles aux grands domaines d'applications scientifiques et industriels pour exploiter pleinement les capacités des futures machines exascale.

Copiloté par le CNRS, le CEA et Inria, NumPEx contribuera à la constitution d'un ensemble souverain d'outils, de logiciels et de formations à destination des utilisateurs de l'exascale. « *Cette mobilisation des différents acteurs du HPC vise à développer un écosystème national exascale, coordonné avec la stratégie européenne, pour que la France reste un des leaders du domaine et que l'Europe soit à la pointe de la compétition internationale* », souligne Jérôme Bobin, directeur de recherche et copilote CEA de NumPEx. « *Investir dans les applications permet de capitaliser un savoir et une expertise sur le long terme, dépassant la durée de vie d'un supercalculateur. C'est essentiel pour assurer notre souveraineté scientifique et technologique* », complète Christophe Calvin.



L'exascale s'avère ainsi un puissant moteur pour la recherche et l'industrie française et européenne, des technologies matérielles jusqu'aux logiciels applicatifs, et ce, bien au-delà du seul HPC.



(Re)découvrez l'univers des supercalculateurs raconté dans cette conférence organisée par le CEA à l'occasion des Journées nationales de l'ingénieur.e 2023.

CExA, le moonshot made in CEA

« *Nous avons choisi d'aller sur la Lune […] non pas parce que c'est facile, mais justement parce que c'est difficile* ». Cette phrase, prononcée par John Fitzgerald Kennedy, le 12 septembre 1962 en Floride, résume la philosophie du moonshot : comme un voyage vers la Lune, c'est un objectif important, *a priori* irréaliste mais sur lequel on met le paquet. Acronyme de « calcul exascale adapté au CEA », le moonshot CExA ambitionne de développer une bibliothèque logicielle européenne pour aider les applications à tirer tous les bénéfices des accélérateurs graphiques qui équiperont les premiers supercalculateurs exascale. Quatre applications de simulation numérique sont embarquées dans l'aventure CExA, qui bénéficiera aussi du soutien du PEPR NumPEx.

L'exascale fait son nid

L'arrivée de l'exascale bénéficiera à tous les domaines de recherche. Coup de projecteur sur quelques applications emblématiques et les progrès attendus grâce aux capacités démultipliées.

WarpX, pour la physique des accélérateurs et de l'interaction laser-matière

Le code 3D open source WarpX et sa librairie multiphysique Picsar sont le fruit d'un effort international au sein duquel des équipes du CEA et du *Lawrence Berkeley National Laboratory* (États-Unis) jouent un rôle clé. WarpX-Picsar permet de simuler de nombreux processus à l'œuvre en physique des accélérateurs et de l'interaction laser-matière, dont les retombées attendues aux plans fondamental, sociétal et industriel sont très prometteuses. Lauréates du prix Gordon Bell 2022 (l'un des prix les plus prestigieux dans le domaine du HPC), les équipes ont démontré les capacités de ce code à s'exécuter sur les plus grands supercalculateurs du monde à l'échelle de l'exascale. Leurs travaux font également avancer de manière significative la modélisation réaliste d'accélérateurs de particules à base de laser. Ces accélérateurs sont notamment utilisés pour la radiothérapie Flash, une irradiation à ultra-haut débit de dose, délivrée en une fraction de seconde pour détruire les cellules tumorales tout en épargnant les tissus sains. Ces simulations permettront de valider le concept du système expérimental mis au point par le CEA.



Avec SKA, le déluge de données

Cet ensemble de réseaux d'antennes est en cours d'installation en Afrique du Sud et en Australie, pour observer le ciel dans la gamme des ondes radio. Il génèrera un gigantesque flux continu de données, équivalant à 200 000 milliards de livres numériques. À titre de comparaison, la BNF en conserve « seulement » 15 millions ! D'où la nécessité de l'exascale pour analyser les données qui seront produites et prétraitées par des centres régionaux de calcul.

Neuro et astro : objectif commun

Des barrières matérielles et non conceptuelles : voilà à quoi se heurtent l'exploration du cerveau et celle de l'Univers. Toutes deux nécessitent une puissance de calcul et une capacité de traitement de données que les supercalculateurs actuels peinent à offrir. Experts en IRM et en radio-interférométrie partagent le même objectif, à savoir obtenir les images les plus pertinentes possibles d'une zone particulière du cerveau ou d'une galaxie par exemple, dans un temps d'observation raisonnable et avec toujours plus de précision.

Modéliser les plasmas de fusion avec Gysela

De l'exascale, c'est ce qu'il faudra au code Gysela pour modéliser les plasmas de fusion du tokamak Iter, actuellement en construction à Cadarache (Bouches-du-Rhône). Ce code – développé depuis 20 ans au CEA au travers de collaborations nationales et internationales – modélise le transport et la turbulence dans ces plasmas en vue de les comprendre, les prédire et, si possible, les contrôler. Aujourd'hui, simuler des plasmas de West, le tokamak en opération au CEA, demande près de quatre jours de calcul sur un maillage environ 30 fois moins gros que celui nécessaire pour Iter.

Dans les assemblages combustibles

Le passage à l'exascale permettra de simuler les écoulements de fluides entre les crayons (sous-canaux) des assemblages combustibles dans les réacteurs à eau pressurisée du parc électronucléaire français. Pour simuler l'écoulement de l'eau à l'échelle la plus fine dans un sous-canal, il faudra compter 100 milliards de mailles, et jusqu'à 5 000 milliards pour un assemblage complet.

Pour le calcul de la puissance dans le cœur

Un calcul de démonstration de parallélisme multiniveaux a été conduit récemment sur les supercalculateurs du Très grand centre de calcul du CEA pour simuler le transport de neutrons dans le cœur d'un réacteur EPR. 12 heures de simulations sur plus de 410 000 processeurs ont permis de calculer l'équivalent de trois cycles de fonctionnement du réacteur (plus de 950 jours), avec accès à la puissance 3D des 70 000 crayons combustibles du cœur.

Climat : l'immense défi

Depuis les années 1970, les modèles de climat, utilisés à des fins de prévisions et de compréhension du système climatique terrestre, ont bénéficié des progrès du HPC, notamment de la croissance continue de la puissance de calcul à disposition. Si l'arrivée des machines exascale est très attendue pour gagner en résolution et mieux représenter la complexité du système climatique, elle nécessite aussi de reconsidérer la structure de ces modèles, voire de développer des briques supplémentaires. Un défi logiciel immense, avec près de 500 000 lignes de code à adapter, qui requiert une coopération active entre climatologues et experts du HPC.

© Silvano Rebai – Fotolia

À la recherche de candidats prometteurs

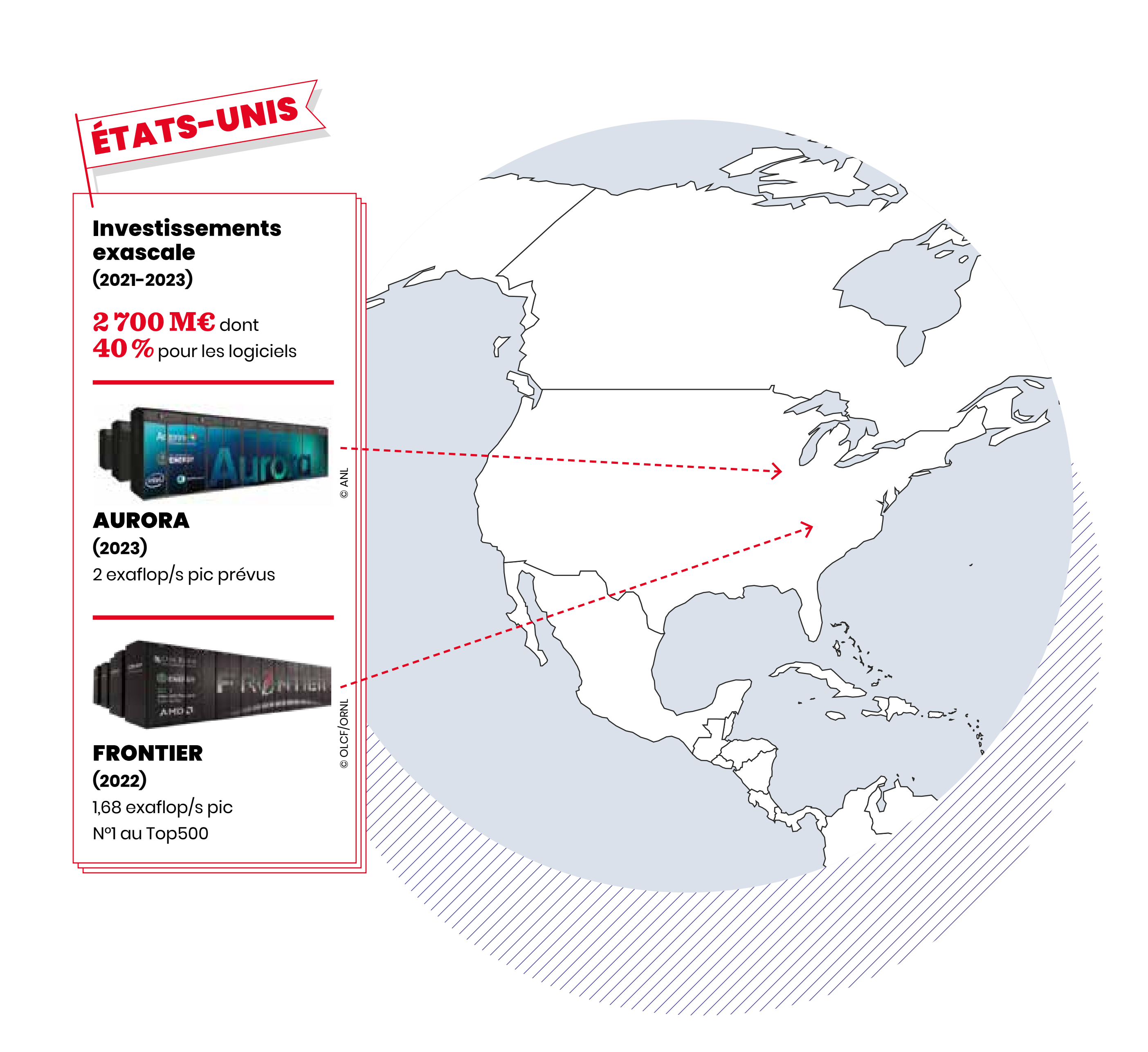
Selon la théorie, certains hydrures – matériaux constitués d'hydrogène et d'un ou plusieurs métaux – développeraient, sous de très hautes pressions de l'ordre du million d'atmosphères, une propriété aussi étonnante que séduisante : la supraconductivité, c'est-à-dire l'absence de résistance au passage d'un courant électrique (et donc de déperdition d'énergie), à (presque) température ambiante. De quoi concurrencer les métaux supraconducteurs conventionnels classiques, qui ont besoin d'être refroidis à de très basses températures pour que cette propriété se manifeste. Ces « super-hydrures », ainsi nommés parce qu'ils contiennent énormément d'hydrogène, font l'objet d'intenses recherches, notamment pour prédire numériquement les structures les plus prometteuses (avec l'objectif de trouver celles qui pourraient être ramenées à pression ambiante), et ainsi servir de guide aux expériences. Ces simulations demandent de nombreuses heures de calcul et nécessitent l'emploi de supercalculateurs.

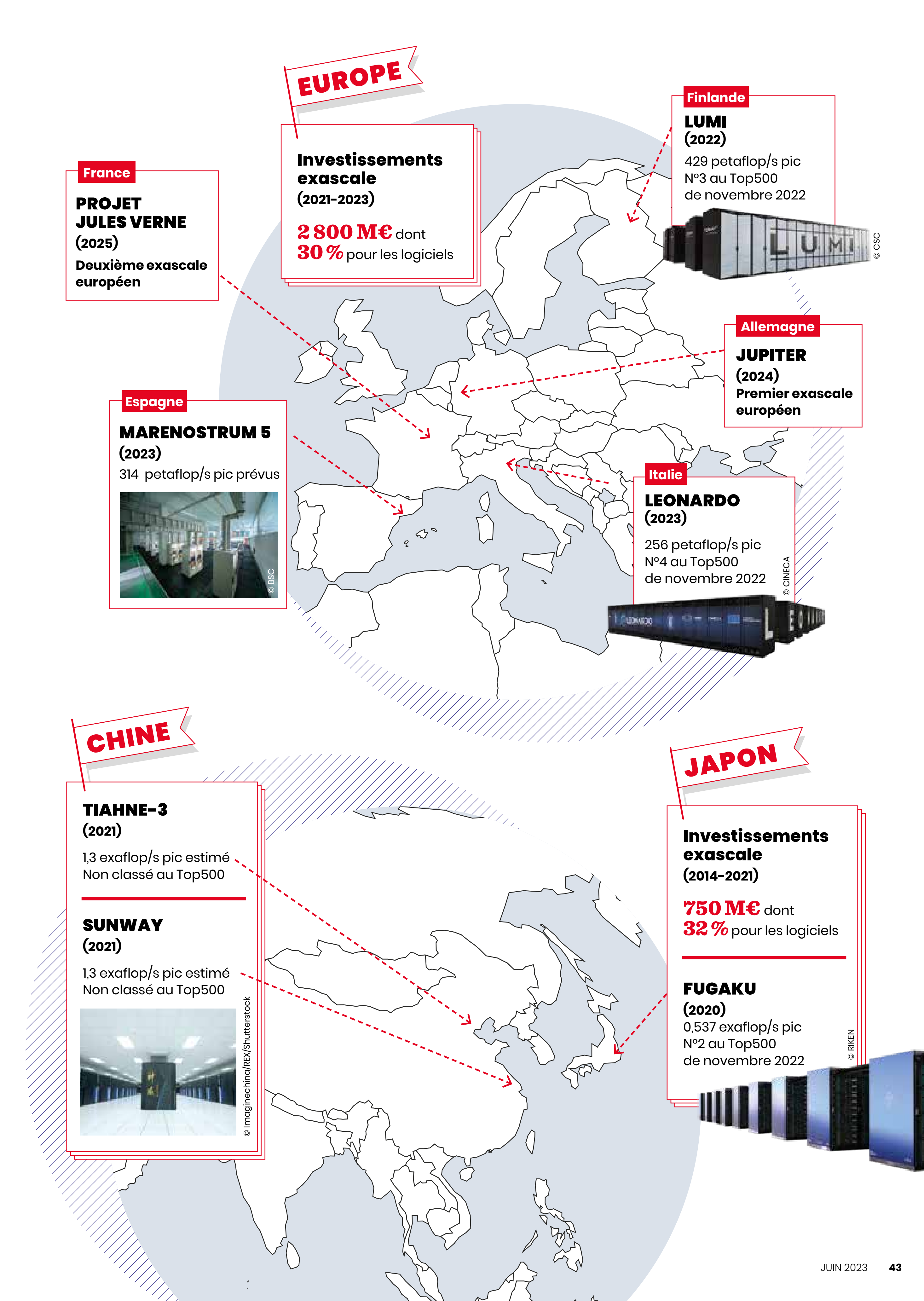
Piles à combustible : optimiser le fonctionnement

Développées depuis plus de 15 ans au CEA, la modélisation et la simulation numérique des piles à combustible à membrane échangeuse de protons ont pour objectif de disposer de résultats de référence, sans compromis ni sur la géométrie complexe de cette technologie, ni sur la fidélité physique de la dizaine de phénomènes distincts qui s'y jouent. D'où la nécessité de recourir au HPC, et bientôt à l'exascale pour en optimiser, à terme, le fonctionnement.

Les territoires de l'exascale

Les États-Unis, la Chine, le Japon et l'Europe sont aujourd'hui les grands acteurs du calcul haute performance dans le monde. Tour d'horizon des forces en présence dans un contexte de forte compétition en matière d'investissements pour les infrastructures de calcul et les technologies matérielles et logicielles.





EUROPE
Investissements exascale
(2021-2023)
2 800 M€ dont
30 % pour les logiciels
Finlande
LUMI
(2022)
429 petaflop/s pic
N°3 au Top500
de novembre 2022
© CSC
France
PROJET JULES VERNE
(2025)
Deuxième exascale européen
Allemagne
JUPITER
(2024)
Premier exascale européen
Espagne
MARENOSTRUM 5
(2023)
314 petaflop/s pic prévus
© BSC
Italie
LEONARDO
(2023)
256 petaflop/s pic
N°4 au Top500
de novembre 2022
© CINECA
CHINE
TIAHNE-3
(2021)
1,3 exaflop/s pic estimé
Non classé au Top500
SUNWAY
(2021)
1,3 exaflop/s pic estimé
Non classé au Top500
© Imaginechina/REX/Shutterstock
JAPON
Investissements exascale
(2014-2021)
750 M€ dont
32 % pour les logiciels
FUGAKU
(2020)
0,537 exaflop/s pic
N°2 au Top500
de novembre 2022
© RIKEN

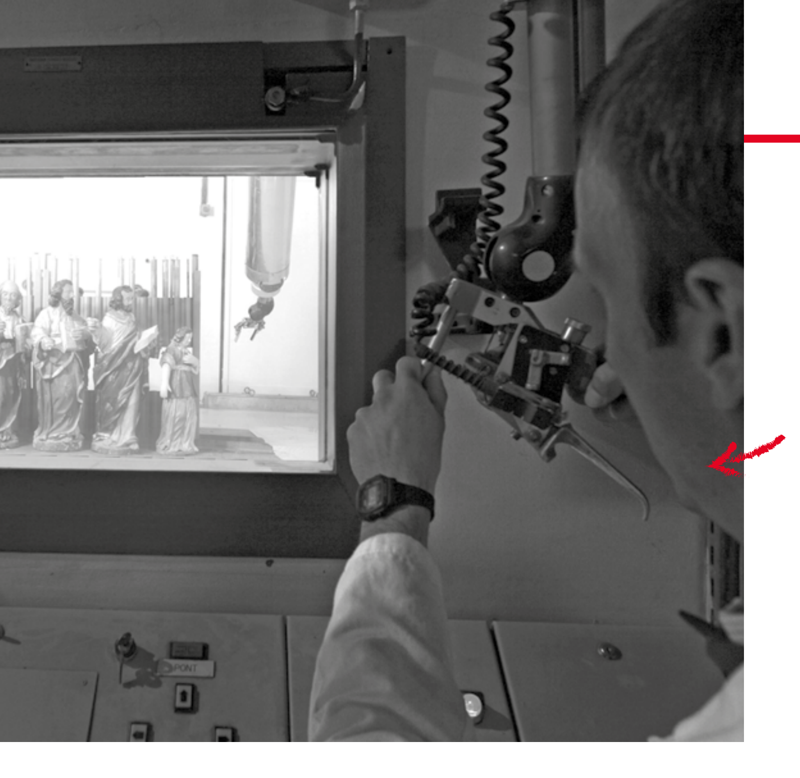
Cure de jouvence pour Ramsès II


© Arc-Nucléart/CEA


© Arc-Nucléart/CEA

C'est un souverain bien fatigué qui atterrit en grande pompe à Paris le 26 septembre 1976. **Infesté de champignons et autres bactéries qui le rongent de l'intérieur**, Ramsès II vient en France se faire soigner. Installé dans une salle spéciale du Musée de l'homme, le pharaon voit se succéder nombre de scientifiques venus l'étudier et préparer son traitement.





La méthode sélectionnée pour venir à bout de ces micro-organismes : l'irradiation gamma, dont le CEA s'est fait une spécialité dès le début des années 1970 dans le domaine de la conservation du patrimoine culturel. Grâce au programme Nucléart, des milliers d'objets, comme ce groupe d'Apôtres, sont traités au fil des ans.

Les rayons gamma ont le pouvoir de guérir les objets malades sans les rendre radioactifs ni les altérer. Ils peuvent passer au travers d'un emballage, ce qui évite les manipulations directes répétées et les risques d'endommagement. C'est donc ce traitement qui est appliqué, avec succès, à Ramsès II, après une campagne d'essais de grande ampleur, notamment sur plusieurs momies des collections nationales.

L'ensemble des tests préliminaires sont réalisés à Grenoble et permettent de déterminer les doses à appliquer pour détruire plus d'une soixantaine d'espèces nuisibles recensées dans le corps du pharaon et vérifier l'absence d'effet nocif sur ses constituants. Mais c'est à Saclay, qui dispose de l'irradiateur Poséidon comparable à celui de Grenoble, que Ramsès II subit sa séance curative, lui évitant ainsi un long déplacement. **Le 9 mai 1977, la dépouille y reçoit 18 000 grays pendant 12 heures et 40 minutes**. Débarrassé de ses hôtes mortifères, Ramsès II regagne le lendemain l'Egypte. Et c'est en souvenir de cette opération exceptionnelle que l'Egypte a prêté à la France le sarcophage du pharaon pour l'exposition « Ramsès et l'or des pharaons » !

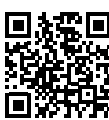


Arc-Nucléart, l'atelier-laboratoire au service du patrimoine

Labellisé « Centre de collaboration pour la préservation du patrimoine culturel par traitement par irradiation » par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) en février dernier, Arc-Nucléart organise chaque année avec le CEA, et en partenariat avec l'Association des maires de France et des présidents d'intercommunalité, un concours pour la conservation et la restauration de biens culturels majoritairement en bois appartenant à des communes françaises. La 22ème édition est ouverte !

www.arc-nucleart.fr

Retrouvez l'histoire en vidéo



L'expo
Ramsès et l'or des pharaons
Grande Halle de La Villette, jusqu'au 6 septembre 2023

L'EUROPE RENOUE AVEC LA MICRO-ÉLECTRONIQUE



La pandémie de Covid-19 et les tensions géopolitiques ont provoqué une pénurie de composants électroniques, qui a touché les industries européennes. En réaction, l'Europe et la France ont lancé plusieurs plans d'investissement, auxquels prend part le CEA. Grâce à leur vision d'ensemble de la chaîne de valeur, les équipes relèvent le défi et préparent les technologies pour les puces du futur.



Si vous avez commandé une voiture ou un ordinateur ces deux dernières années, vous avez probablement attendu... longtemps. En cause : une pénurie mondiale de composants électroniques. La pandémie de Covid-19 et les confinements ont mis à mal les liens avec l'Asie, qui génère plus de 80 % de la production mondiale. En parallèle, les usages numériques ont explosé, entraînant des tensions d'approvisionnement.

Début 2023, la situation s'améliore progressivement. États comme industriels ont tiré les enseignements des mois écoulés, car, au-delà de l'attente pour les consommateurs, cette crise a révélé des enjeux de souveraineté, avec une trop forte dépendance à l'Asie qui a paralysé d'autres secteurs économiques. « *Le problème a particulièrement touché les constructeurs automobiles, qui avaient l'habitude d'acheter les composants électroniques à flux tendu et à moindre coût,* décrypte Jean-René Lèquepeys, directeur adjoint du Leti, l'institut du CEA dédié à l'électronique et aux technologies de l'information. *Quand il y a eu beaucoup de demandes, les fabricants ont livré en priorité leurs plus gros clients. À savoir les géants du numérique.* » Et les autres chaînes ont dû ralentir, voire s'arrêter.

Un « Chips Act » européen et le plan France 2030

Pourtant, l'Europe représentait plus de 40 % de la production mondiale de puces électroniques dans les années 1990. Et seulement 8 % aujourd'hui. Que s'est-il passé ? Déjà, un manque d'investissement dans de nouvelles entités de production. Dans le secteur, la R&D engloutit entre 15 et 20 % du chiffre d'affaires annuel. Surtout, le marché a dépassé de loin les capacités de production. Aux smartphones et ordinateurs portables sont venus se rajouter des besoins dans la santé, la mobilité, la domotique, les énergies et bien d'autres domaines où le numérique joue un rôle. « *La France n'a pas fermé d'usine, simplement les demandes ont considérablement grandi,* retrace Jean-René Lèquepeys.

LES ORIGINES DU FD-SOI

À l'origine, il y a plus de quarante ans de cela, le CEA souhaitait rendre les transistors moins sensibles aux effets des radiations. Les chercheurs pensent alors à des plaques fines, avec une couche isolante d'oxyde, au lieu des blocs massifs de silicium en vigueur. Leur technologie évolue au cours des décennies en partenariat avec les industriels du secteur, pour aboutir au FD-SOI.

Le secteur des semi-conducteurs a connu une très forte croissance qui n'a pu être satisfaite sur des technologies matures, car engendrant des investissements économiquement non viables sur le long terme. » En parallèle de ces tensions de fabrication, existent également des tensions géopolitiques, avec une « guerre » économique entre les États-Unis et la Chine.
En réponse, l'Europe a lancé le « *EU Chips Act* », un plan d'investissement de 43 milliards d'euros. Objectif ? Passer la capacité de production européenne de 8 % à 20 % à horizon 2030, dans un marché qui va doubler. Avec le plan France 2030, l'État français a, de son côté, débloqué six milliards d'euros et mis en place plusieurs programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR).

Dans ce cadre et pour développer les composants électroniques d'avenir, le CEA bénéficie d'un soutien financier, assorti d'un plan d'emploi de 100 CDI et 100 CDD supplémentaires. « *La France et l'Europe ont pris conscience de l'importance des organismes de recherche et de technologie comme le CEA pour répondre aux enjeux de souveraineté et de résilience,* se félicite Sébastien Dauvé, à la tête de l'institut Leti. *Les opportunités d'innovation n'ont jamais été aussi nombreuses, à la fois pour créer des ruptures technologiques et pour répondre aux problématiques environnementales.* ».

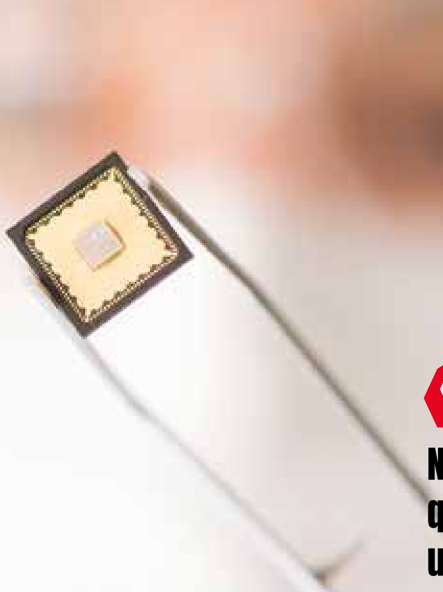
La vallée grenobloise peut compter sur son savoir-faire historique. C'est ici, dans ce qui s'appelait alors le centre d'études nucléaires de Grenoble, qu'est fabriqué le premier circuit intégré français au milieu des années 1960. Et c'est ici aussi que sont créées les deux « spin-off » avec lesquelles le CEA collabore encore aujourd'hui, STMicroelectronics et Soitec. En partenariat avec ces deux géants, qui emploient plusieurs milliers de personnes chacun, et grâce à un financement de l'Agence nationale de la recherche, le CEA déploie son plan NextGen pour réfléchir aux prochaines générations de substrats et de transistors FD-SOI.

40 %
Ce sont les économies d'énergie permises par les transistors FD-SOI par rapport à des transistors sur silicium massif.

Une technologie made in Grenoble

Née au CEA à Grenoble (voir encadré), la technologie FD-SOI se retrouve déjà dans les puces des automobiles, des montres connectées, ou encore de certains smartphones du géant Google. « *Tout ce qui nécessite une interaction avec l'extérieur, avec des capteurs par exemple, demande des microcontrôleurs. Le FD-SOI est parfait pour cela* », décrit Olivier Rozeau, spécialiste de ce procédé.

Le FD-SOI, sur lequel le CEA a déposé près de 150 brevets, est performant en puissance de calcul, moins gourmand en énergie, et moins cher à fabriquer. « *L'avantage du FD-SOI réside dans la possibilité de mettre une tension sur la face arrière du transistor, pour le rendre soit très rapide, soit très économe en énergie* », explique Jean-René Lèquepeys. Par rapport aux transistors sur silicium massif, le FD-SOI nécessite jusqu'à 40 % d'énergie en moins, et s'avère donc très bien adapté au marché basse consommation et à l'électronique embarquée (automobile, communications, *smart devices*, santé connectée, etc.).



« Nous utilisons les mêmes machines que dans les usines pour assurer un transfert rapide de nos découvertes vers le monde industriel. »

Jean-René Lèquepeys, directeur adjoint du Leti

© P.Jayet/CEA

Nouvelle salle blanche, nouveaux équipements

Après des nœuds FD-SOI de 28, 22 et 18 nm, les équipes cherchent à mettre au point le 10 nm et en-deçà. « *Il s'agit de réaliser une solution non seulement efficace, mais aussi pertinente industriellement, qui réponde à une demande du marché,* avance Olivier Rozeau. *Pour cela, nous nous appuyons sur les feuilles de routes des entreprises, avec lesquelles nous formons un véritable écosystème.* » « *Nous visons un transfert vers les industriels fin 2026, pour une production à Crolles, en Isère, sur le site de STMicroelectronics* », précise Chrystel Deguet, adjointe au directeur du Leti en charge de l'évolution de la plateforme microélectronique. Plusieurs dizaines de nouveaux brevets devraient aboutir dans le cadre de ce plan.

Pour réussir cette rupture technologique, le CEA investit dans plus d'une quarantaine de nouveaux équipements, tel un scanner à immersion pour la lithographie. « *Nous utilisons les mêmes machines que dans les usines, avec un modèle « lab to fab » qui permet d'assurer un transfert rapide de nos découvertes vers le monde industriel* », explique Jean-René Lèquepeys. « *Ces équipements, qui correspondent aux*

UNE GESTION RAISONNÉE DE L'EAU

Sans eau, pas de microélectronique. Les salles blanches du CEA à Grenoble utilisent l'eau du Drac, prélevée sous la presqu'île scientifique. Il ne s'agit ni d'eau potable, ni d'une nappe phréatique et cette eau ne sert pas à d'autre usage. Après utilisation par le CEA, elle est presque intégralement rendue au milieu naturel. Elle est rejetée propre, en conformité avec la réglementation. Deux tiers de cette eau servent à refroidir les équipements et un tiers est utilisé lors des processus de fabrication des puces. Des actions pour réduire la consommation sont engagées, comme l'amélioration de certains procédés de fabrication ou l'optimisation du fonctionnement des machines. Pour les futures salles blanches, les contraintes de sobriété hydrique et les impacts du changement climatique ont été pris en compte.

8 %
C'est la part que représente aujourd'hui l'Europe dans la production mondiale de puces électroniques, contre 40 % dans les années 1990.

43 milliards d'euros
C'est le montant du plan européen « *Chips Act* » pour relancer la filière microélectronique.

exigences industrielles, demandent des salles blanches plus performantes, indique Chrystel Deguet. *Nous construisons donc en parallèle une nouvelle salle blanche, pour compléter les nôtres qui datent d'il y a une trentaine d'années, avec une prise en compte de la sobriété énergétique et de la réduction des matières premières.* »

Des partenaires européens pour le CEA

L'avenir se construit également à l'international, avec d'autres acteurs clés de la microélectronique, tels l'Imec en Belgique et le réseau d'instituts Fraunhofer en Allemagne. « *L'Imec est connu pour ses travaux amont, sur les équipements de lithographie et les transistors de dernière génération, tandis que les instituts Fraunhofer s'occupent plutôt du packaging avancé, avec un choix du nœud technologique le plus adapté selon les besoins,* détaille Jean-René Lèquepeys. *Avec le CEA, cela permet de couvrir toute la chaîne de production. Nous avons passé une alliance pour répondre ensemble aux défis du Chips Act européen.* » Les premiers appels à projet sont attendus pour l'automne.

Il y a urgence, car du côté américain et asiatique, les plans industriels sont sur les rails. Les États-Unis ont annoncé leur propre « *US Chips Act* », avec un budget global de 52 milliards de dollars. Le fabricant taïwanais TSMC et le coréen Samsung ont déjà manifesté leur intérêt pour ouvrir des usines subventionnées aux États-Unis. Même si les négociations étaient encore en cours au moment d'écrire ce dossier, car Washington impose des restrictions sur les liens avec la Chine pour les bénéficiaires. Samsung a par ailleurs annoncé un investissement colossal de 230 milliards de dollars à horizon 2042, pour produire des puces en Corée du Sud.

Pérenniser le savoir-faire industriel français

Il s'agit donc pour l'Europe de ne pas se laisser distancer, de protéger son savoir-faire tout en prenant pied dans un monde toujours plus numérique. Pour répondre à ces enjeux de souveraineté, d'emploi, et d'environnement (voir les entretiens sur l'éco-innovation page 56), « *le CEA bénéficie d'une vision intégrée et globale qui fait de lui un facteur de réussite* », juge Michael Tchagaspanian, directeur des partenariats industriels au Leti. Car au-delà de la conception, le CEA travaille également avec les systémiers et les équipementiers qui utilisent les circuits électroniques en bout de chaîne. « *Il est important pour eux d'anticiper les évolutions pour voir quels seront les composants de demain* », justifie le responsable. Au total, plus de 200 partenaires industriels ! Et le CEA n'hésite pas à lancer des start-up quand il n'existe pas d'acteur sur un nouveau créneau. « *Les recherches menées par le CEA permettent une différentiation, avec une vraie valeur ajoutée,* estime Michael Tchagaspanian. *Nous contribuons à rendre le tissu industriel français plus performant et plus pérenne.* » ●



L'implication du CEA

NOS ACTIONS
pour l'avenir de la microélectronique se développent selon quatre axes :

- **Recherche fondamentale** en amont pour les ruptures technologiques de demain, notamment celles touchant au quantique et à la spintronique
- **Préparation des futures applications** industrielles avec la suite de la technologie FD-SOI, grâce à l'investissement France 2030 et au *Chips Act* européen
- **Renforcement des partenariats** aux niveaux national et international, aussi bien avec les organismes de recherche qu'avec les acteurs industriels
- **Création de start-up** industrielles

NOTRE FEUILLE DE ROUTE
est découpée en deux phases concrètes :

2022-2026
préparation d'une nouvelle génération de FD-SOI 10 nm et en-deçà

2027-2030
développement d'une technologie GAA (*gate-all-around*), avec une architecture en 3D, pour des nœuds 5 nm et en-deçà

CHIFFRES-CLÉS

200
recrutements
prévus au sein du CEA dans le bassin grenoblois pour le projet NextGen

Une trentaine
de grands partenaires industriels nationaux,
dont STMicrolectronics, Soitec, Renault, Safran, Atos…

150
brevets
déjà déposés par le CEA autour de la technologie FD-SOI

3
PEPR stratégiques
dans le domaine de la microélectronique copilotés par le CEA (technologies quantiques, électronique et 5G)



Le CEA accompagne les industries européennes dans leur compétitivité et leur résilience »



Engagé auprès des industriels, le CEA prépare dès aujourd'hui les usages technologiques de demain. Julie Galland, directrice de la recherche technologique au CEA, nous explique comment rester à la pointe du marché de la microélectronique.

Quel regard portez-vous sur les pénuries qui ont touché le secteur de la microélectronique ces dernières années ?

Julie Galland —— Cette crise a mis en lumière la dépendance de l'industrie européenne et française aux grands pourvoyeurs de composants, à savoir le Taïwanais TSMC et le Coréen Samsung. Dépendance accentuée par le faible poids économique de nos industries dans le portefeuille de ces grands fondeurs. L'ensemble de l'automobile mondiale ne représente qu'un peu plus de 8 % de la production de composants, répartie sur des centaines de référence. En comparaison, certains fabricants de smartphones représentent à eux seuls jusqu'à 25 % du marché de ces fondeurs ! Plus gros clients, ces grands noms de la téléphonie ont été servis en priorité au plus fort de la pénurie. Devant ce constat, les pouvoirs publics ont souhaité regagner en résilience et en souveraineté. D'où plusieurs programmes d'investissement majeur, dont le *Chips Act* européen et le plan France 2030.

Quel est le rôle du CEA dans cette trajectoire ?

J.G. —— Depuis plus de 30 ans, le CEA accompagne l'écosystème français de la microélectronique pour aider à élaborer, industrialiser, et commercialiser les technologies de demain. Nous assurons le transfert industriel, avec des partenaires historiques comme STMicroelectronics

BIO EXPRESS Diplômée de l'École polytechnique, ingénieure en chef des mines et titulaire d'un doctorat en physique du solide. **2013** | Cheffe du bureau de la nanoélectronique à la Direction générale des entreprises (DGE). **2017** | Cheffe du bureau des industries de santé, DGE. **2020** | Sous-directrice en charge du spatial, de l'électronique et du logiciel, DGE **2023** | Directrice de la recherche technologique au CEA.

et Soitec, ainsi que d'autres acteurs de la microélectronique en France. Nous participons notamment aux projets importants d'intérêt européen commun (IPCEI). Ces choix technologiques ne sortent pas de nulle part, ils sont orientés selon les besoins des filières industrielles, telles que les transports, les machines-outils, la défense ou le spatial. Nous accompagnons aussi le projet de « méga-fab » de STMicroelectronics et GlobalFoundries, à Crolles, en Isère. Cette usine, la plus grande du genre en France, doit doubler la capacité de production actuelle du site et rivaliser avec les implantations asiatiques. Elle a vocation à industrialiser les ruptures technologiques que nous mettons aujourd'hui au point.

Comment s'articulent cette approche industrielle et la recherche plus fondamentale menée par le CEA ?

J.G. —— Le CEA a la capacité d'identifier les ruptures qui feront sens dans dix à quinze ans, voire au-delà. Le dialogue constant entre recherches fondamentale et technologique nous permet de faire mûrir ces innovations pour les amener peu à peu vers les spécifications et la reproductibilité requises par le marché. Cela permet ensuite aux industriels de s'en saisir et de les intégrer dans leurs développements produits. Les besoins industriels s'expriment sur des horizons de trois à cinq ans, mais pour que la technologie soit prête, il faut dix bonnes années de R&D auparavant !

Et sur quelles ruptures travaille actuellement le CEA ?

J.G. —— La liste est longue ! Pour un avenir proche, nous travaillons sur l'électronique de puissance, notamment pour la mobilité électrique, en introduisant de nouveaux matériaux comme le carbure de silicium ou le nitrure de gallium. Nous explorons également le calcul en environnement embarqué. Les applications nomades nécessitent à la fois frugalité énergétique et mémoires embarquées, le tout avec une sécurité de fonctionnement. Cela demande de penser aussi bien le matériel que le logiciel, une polyvalence qui est l'une des grandes forces du CEA.

« Nous savons identifier les ruptures qui feront sens dans les dix prochaines années. »

Dans une approche plus fondamentale, en amont, les équipes travaillent sur des architectures novatrices – couplant processeurs et mémoires, ou encore sur de nouveaux matériaux pour des composants alliant frugalité et rapidité. Elles réfléchissent aussi aux futurs capteurs pour le médical ou le spatial. Enfin, le CEA se mobilise dans le cadre de la stratégie quantique, qu'il s'agisse de l'ordinateur quantique, de la cryptographie post-quantique, des télécommunications ou des capteurs. Nous soutenons les start-up du domaine, dont Siquance, start-up issue du CEA et du CNRS.
Dans toutes ces démarches, nous intégrons évidemment les enjeux de frugalité énergétique et de ressources. On pourrait penser qu'il s'agit de problématiques sur les « consommables », mais l'écoconception amène rapidement à des problèmes assez fondamentaux en science.

Les fabricants asiatiques réalisent des nœuds jusqu'à 3 nm. Est-ce que la France, avec le projet NextGen de nœuds 10 nm, est en retard ?

J.G. —— Non. Les nœuds des constructeurs asiatiques répondent au marché des processeurs, tiré par la puissance de calcul pure. Ce n'est pas le marché sur lequel nous sommes positionnés. La France et le CEA visent plutôt la fonctionnalité, en réponse à la diversité des besoins de nos industries.

C'est-à-dire ?

J.G. —— Si l'on regarde du côté utilisateur, il existe deux grandes catégories. D'un côté, les applications qui nécessitent une puissance de calcul brute. De l'autre, les applications embarquées, tels les calculateurs d'une voiture pour l'aide à la conduite. Ces systèmes offrent des fonctionnalités essentielles sans être reliés à Internet ou au réseau électrique. Avec donc de fortes contraintes en taille de mémoire, en consommation énergétique mais aussi en sécurité et en fiabilité.
La spécialité du CEA réside dans cette deuxième voie, avec l'enrichissement des fonctionnalités sur un même composant. C'est ce secteur qui contribue à ce que le numérique se diffuse toujours plus dans notre quotidien et nous rend de nouveaux services. Le CEA et l'industrie française sont donc bien placés, dans un secteur en pleine croissance. ●

Focus sur les TECHNOS D'AVENIR

L'avenir de l'électronique se doit d'être moins gourmand en énergie, plus portable, et plus rapide. Autant de défis que relèvent les recherches fondamentale et industrielle du CEA.

SPINTRONIQUE

Et si l'électronique utilisait un petit plus pour consommer moins ? La spintronique, sur laquelle travaillent près de 150 personnes au sein de deux unités du CEA (Spintec et Spec), fait appel non seulement à la charge électrique de l'électron, mais également à son spin, une propriété quantique. « *C'est le moment magnétique de l'électron,* décrit Lucian Prejbeanu, à la tête de Spintec. *Cela correspond schématiquement à la rotation autour de son axe.* » En cumulant électronique et magnétisme, la spintronique offre un avantage pour stocker des informations : la non-volatilité. « *La spintronique permet de créer des mémoires magnétiques, qui gardent l'information même lorsqu'elles ne sont plus alimentées électriquement* », explique le spécialiste. Une belle piste pour économiser l'énergie ! Des concepts issus de la spintronique sont déjà commercialisés dans des disques durs et des capteurs magnétiques. Le CEA copilote le PEPR (programme et équipement prioritaire de recherche) exploratoire SPIN et travaille sur des applications concrètes liées à l'intelligence artificielle ou à l'Internet des objets. Cinq start-up ont déjà été essaimées et une sixième est en cours de maturation.



MÉMOIRES NON VOLATILES

La spintronique a permis le développement de mémoires magnétiques, un type particulier de mémoires non volatiles. Ces dernières désignent toute mémoire vive capable de conserver les informations inscrites même sans alimentation électrique, un peu à l'image des cartes perforées des tout premiers ordinateurs. Le CEA travaille sur ces mémoires non volatiles : MRAM (mémoires magnétiques), PCRAM (mémoires à changement de phases) et RRAM (mémoires résistives). « *Les recherches du CEA couvrent tout le spectre de ces technologies,* témoigne Thomas Ernst, directeur scientifique de l'institut Leti du CEA. *Cela nous permet aussi de les comparer entre elles, ce qui est très apprécié côté industrie.* »

ARCHITECTURES DE CALCUL EN RUPTURE

Les nouvelles mémoires issues de la spintronique permettent des architectures de calcul innovantes. Aujourd'hui, le transfert des données entre mémoire et processeur ralentit le calcul et consomme beaucoup. Les constructeurs cherchent donc à rapprocher les deux pour économiser en temps et en énergie de trajet. Demain, le calcul pourrait se faire directement dans la mémoire. « *Ces architectures sont très utiles pour l'intelligence artificielle et le calcul embarqué* », indique Lucian Prejbeanu. Un projet autour du calcul dans la mémoire est au cœur du PEPR électronique.

Pour aller plus loin dans l'exploration de la spintronique, flashez ce QR code

L'éco-innovation : un impératif pour tous

« *La demande est forte de la part des équipes.* »

Léa Di Cioccio, responsable du programme éco-innovation du CEA-Leti


© C. Morel/CEA

La micro-électronique a des impacts environnementaux non négligeables, notamment en matière d'émissions de gaz à effet de serre et d'utilisation de ressources. Face à ces enjeux, le CEA s'est engagé en faveur de l'éco-innovation.
L'innovation consiste à développer des technologies créatrices de valeurs, pour amener à un nouveau marché ou améliorer la compétitivité. Avec l'éco-innovation, nous intégrons, en plus de l'aspect économique, les aspects environnementaux et sociétaux. Chaque développement technologique est passé au crible, avec des analyses de cycle de vie (ACV). Celles-ci prennent en compte 16 catégories (épuisement des ressources, acidification, eutrophisation, etc.) pour tous les composants et à toutes les étapes. Chaque point peut ainsi être optimisé avant le transfert industriel. À terme, nous souhaitons orienter les développements vers une économie plus circulaire et compatible avec les limites planétaires.
La demande est très forte du côté des équipes du CEA. Les ingénieurs-chercheurs ont besoin de refaire le lien entre leur cœur de métier – la R&D – et les enjeux climatiques et sociétaux. Nous avons développé un « kit éco-innovation » et nous sommes à l'écoute des équipes, qui connaissent leurs activités et voient quoi changer. Du côté des industriels, nous avons ouvert Y.Spot à Grenoble, un lieu collaboratif pour réfléchir et offrir un prototypage rapide. Il n'existe pas de solution toute faite. Nous devons nous inscrire dans une logique réaliste et pratique, tout en évitant le « *green-washing* ». Le CEA, très attaché à l'intégrité scientifique, est particulièrement écouté sur ce terrain.
L'un des enjeux est d'éviter le transfert d'impacts, de dégrader d'un côté en essayant d'améliorer de l'autre. Par exemple, si vous utilisez de nouveaux matériaux pour réduire la consommation énergétique d'un équipement, il faut mettre en balance les impacts de l'extraction et de l'utilisation de ces matériaux face au gain attendu. Afin de répondre au mieux à ces questions très concrètes, le CEA déploie des projets sur la qualité des données utilisées dans les ACV et leur analyse critique. Nous nous intéressons aussi aux impacts des algorithmes, c'est-à-dire pas uniquement à la partie matérielle mais aussi à la partie logicielle.
Le CEA bénéficie d'une association assez unique entre une excellente compréhension scientifique de la crise climatique, de robustes outils et bases de données développés en interne, et des compétences techniques issues d'une longue histoire. Nous nous devons de contribuer à relever les défis à venir. ●

Au-delà de leur faible consommation énergétique, construire des composants d'avenir invite à une refonte des processus de fabrication, dans une logique d'écoconception. C'est toute cette chaîne d'innovation, plus respectueuse de l'environnement, que le CEA entend mettre en place, comme en témoignent Léa Di Cioccio et Stéphane David.


© ISSP/UL

Le CEA développe une stratégie pour un numérique écoresponsable, stratégie qui implique nos équipes dans une démarche collaborative, ainsi que nos partenaires académiques et industriels. Ces derniers reconnaissent nos capacités en matière d'éco-innovation, car le CEA est l'un des rares acteurs avec une vision systémique et globale, allant du silicium à la programmation, en passant par l'électronique de puissance. Nous sommes capables d'adresser ces sujets avec des solutions optimisées de bout en bout. L'empreinte environnementale d'un produit dépasse sa simple fabrication. Il faut prendre en compte l'ensemble de son cycle de vie, des matières premières à la fin de vie. Quand on entend parler d'externalités négatives, cela signifie souvent que le périmètre du produit a mal été défini. Ces externalités doivent être prises en compte dans une approche réellement écoresponsable.

> *« L'action du CEA embrasse un champ systémique. »*
>
> **Stéphane David,**
> coordinateur programme numérique
> à la Direction de la recherche technologique

Il faut peser chaque implication pour rechercher un compromis optimal, par exemple entre la durée de vie et les possibilités de circularité, du réemploi au recyclage. Pour l'instant, personne ne sait récupérer les traces de métaux et de matières rares qui composent les centaines de couches d'un processeur. Le CEA réfléchit donc dès l'amont, pour une conception vertueuse. Il s'agit de dimensionner les composants et de positionner les bonnes solutions au plus près de l'usage voulu. On laisse le SUV au garage quand un vélo suffit !
À cette frugalité des moyens doit s'ajouter la sobriété des comportements. Si l'on prend les smartphones, un équipement est remplacé en moyenne tous les 34 mois. Et l'ancien va s'entasser dans un placard. D'où le besoin d'agir à deux niveaux : étendre la durée de vie fonctionnelle des terminaux et améliorer le réemploi des « vieux » smartphones. L'empreinte carbone du numérique est aujourd'hui comparable à celle du transport aérien, et croît sans cesse. Nous travaillons donc sur comment faire, techniquement, pour que les usages consomment le moins possible. En parallèle, il est essentiel d'explorer les comportements du côté des sciences humaines et sociales, tout en diffusant les pratiques éco-responsables vers le plus grand nombre.
L'éco-innovation représente un engagement pour l'avenir et un choix économique. Nos partenaires industriels savent qu'il faut investir dans la recherche de solutions technologiques pour réduire leur consommation énergétique et se démarquer dans un marché en croissance. En plus d'un enjeu environnemental, c'est donc un enjeu de compétitivité.

PLONGÉE DANS UNE SALLE BLANCHE DE GRENOBLE

L'avenir de votre téléphone ou de votre voiture ? Il se joue en partie ici.

Reportage photo : A.Aubert/CEA

1

Depuis 1985, c'est dans les salles blanches du Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information du CEA, le Leti, que sont développées des puces électroniques innovantes. Leur mise au point nécessite un environnement ultrapropre et ultracontrôlé, qui s'étend sur plus de 11 000 m²... et qui devrait encore s'agrandir à la fin de l'année 2023.

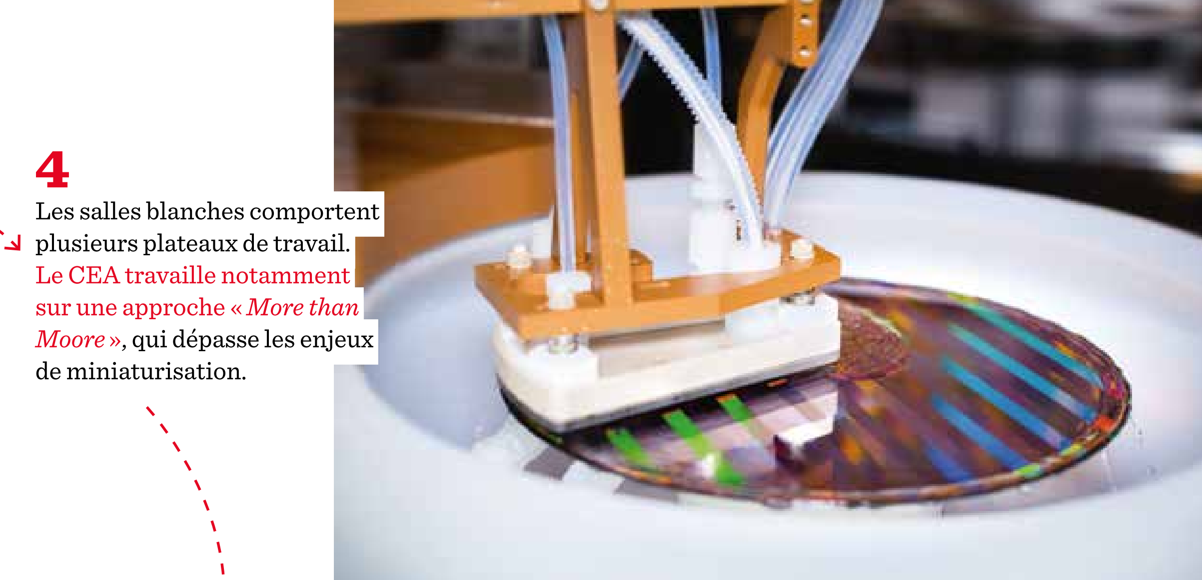
2

Pour limiter l'apport de poussières, qui pourraient endommager les composants, l'air est filtré en permanence et les salles sont en surpression. Le personnel porte une combinaison intégrale, pour éviter toute contamination par des particules extérieures.





3
Ces boîtes renferment des plaques de silicium à divers stades de préparation.



4

Les salles blanches comportent plusieurs plateaux de travail. Le CEA travaille notamment sur une approche « *More than Moore* », qui dépasse les enjeux de miniaturisation.

5

Les centaines de machines sont identiques à celles des usines, de quoi faciliter les liens avec des entreprises comme STMicroelectronics. Il s'agit de réduire les délais entre l'idée, le prototype et l'industrialisation.



6

Les équipements sont regroupés en fonction de la température des traitements. D'un côté, les procédés chauds, à plus de1 000 °C. De l'autre, ceux dits « froids », aux environs de 200 °C. Ici, la lumière passe du blanc au jaune pour les activités liées à la photolithographie.



7

Les combinaisons bleues indiquent le personnel extérieur au CEA. Les équipes travaillent avec tout l'écosystème grenoblois et notamment l'entreprise Soitec, spécialisée dans les substrats.

8

Le CEA réfléchit aux développements de sa technologie de transistors FD-SOI et aux futures puces moins gourmandes en énergie, à travers un projet baptisé NextGen, avec de nouveaux équipements et une nouvelle salle blanche.



Et découvrez aussi le reportage vidéo de Tom Scott à Grenoble


© F. Rhodes
Laurence PIKETTY
administratrice générale adjointe du CEA


© J.C Caslot
Elsa DUCROT
post-doctorante au CEA


© F. Rhodes
Valérie L'HOSTIS
directrice de recherche au CEA

Carrières scientifiques : la mixité, un facteur de réussite


© F. Rhodes
Valérie MASSON-DELMOTTE
directrice de recherche au CEA


© DR
Sara TUCCI
chef de laboratoire au CEA


© UtopikPhoto
Nadège NIEF
directrice adjointe de département au CEA

Cette revue est imprimée dans le Limousin.

Avec nos homologues masculins, nous partageons la même passion pour les sciences. Et nous sommes convaincues qu'aucun métier ne se définit par un genre supposé mais par les compétences qu'il requiert et dont il faut disposer quel que soit son genre.

Même si le regard que la société porte sur la place des femmes a évolué, elles restent encore peu présentes en sciences. Or, nous le constatons tous les jours dans nos activités : plus les équipes sont diversifiées, avec des hommes et des femmes, des jeunes et des moins jeunes, issus de différents horizons, cultures et formations, plus elles s'enrichissent et progressent par le partage des idées, des points de vue, des ressentis. La mixité sous toutes ses formes est un facteur de réussite !

La situation des femmes en sciences s'améliore progressivement et nous nous en réjouissons mais **nous devons rester vigilantes**, continuer d'agir, personnellement comme collectivement, contre les clichés et les stéréotypes véhiculés par l'environnement familial, l'école ou les médias, souvent inconsciemment. Ce « *sexisme inconscient* » nous le combattons aussi dans nos propres réflexes et postures, pour que le « *Ce poste n'est pas pour moi !* » se transforme en « *Quelle opportunité pour moi !* ». C'est un enjeu majeur car **aucune loi ne met instantanément à bas les représentations culturelles qui peuvent persister dans la société et dans l'organisation de nos vies familiales.**



Pour écouter les épisodes de notre podcast « La Cerise dans le Labo », c'est ici !

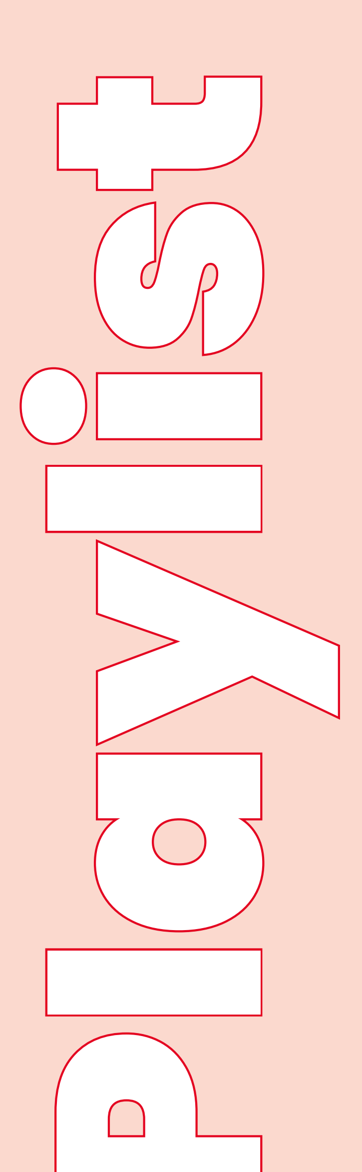
« Au CEA, l'égalité professionnelle est un engagement depuis plus de quarante ans. »

L'entreprise a un rôle important dans ce travail. Au CEA, l'égalité professionnelle est un engagement depuis plus de quarante ans, via trois piliers : favoriser la mixité dans les métiers, appliquer le principe d'égalité de rémunération et d'évolution professionnelle, et promouvoir la conciliation entre vie professionnelle et vie personnelle pour chaque salarié.e. Avec pour objectif que **chacune et chacun trouve sa place au bon endroit et dans les meilleures conditions.**

Poursuivre cette dynamique nécessite que les jeunes femmes soient encouragées à choisir des orientations scientifiques. Des réseaux comme « Parité Diversité Femmes » donnent accès aux ressources et au mentorat qui permettent aux femmes de prendre en main leur destin professionnel, de briser le fameux « plafond de verre ».

Dans cet état d'esprit, nous avons participé avec enthousiasme au podcast « La Cerise dans le Labo ! », produit par le CEA et décliné en bande dessinée, où nous témoignons de nos parcours. Nos métiers sont au cœur d'enjeux majeurs pour l'avenir (transition énergétique et écologique, transformation numérique, médecine du futur…) et nous offrent la liberté de nous accomplir pleinement. Contribuer au progrès des connaissances et au bien-être de la société est un moteur puissant d'épanouissement.

Nous croyons à la mixité, à la diversité, à l'égalité. Nous croyons à l'écoute et au dialogue. Nous croyons à l'affirmation de soi et à aux opportunités d'épanouissement dans des carrières scientifiques et technologiques ouvertes à toutes et tous. Car, comme le dit le slogan du réseau *Women in Sciences* : « *Le monde a besoin de sciences et la science a besoin de femmes* ». ●





En librairie

À l'aube d'une ère nouvelle, celle des machines parlantes, Alexei Grinbaum, directeur de recherche au CEA, raconte comment le dialogue entre humain et non-humain va profondément influencer notre langage et notre façon de penser.

***Parole de machines,* Alexei Grinbaum**
Éditions humenSciences

Les réseaux (sociaux, urbains, financiers…) sont plus que jamais au cœur de l'actualité et partout dans nos vies. Marc Barthelemy, directeur de recherche au CEA et spécialiste des réseaux complexes, décrypte l'efficacité de ces structures qui gouvernent nos sociétés, mais alerte aussi sur leurs risques pour la sécurité du monde.

***Le monde des réseaux*, Marc Barthelemy**
Éditions Odile Jacob

Live ou presque

Cycle « Science toi-même ! »

Le CEA et le CENTQUATRE-PARIS proposent des rencontres entre scientifiques et personnalités du monde artistique, culturel ou des sciences humaines. Au menu, des sujets aussi divers que la ville de demain, le cerveau et l'art, ou encore le futur. Leurs regards croisés permettent de décrypter les mutations de la société et celles de la planète afin de mieux préparer l'avenir.

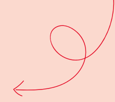


Retrouvez les conférences « Science toi-même ! » en replay sur YouTube

Lumières sur les origines

Si vous l'avez raté, c'est l'occasion de vous plonger, en replay sur YouTube, dans le pari fou du télescope James Webb et ses (déjà) fabuleux résultats.





Sur les réseaux



Roulez… vert, littéralement !

Un quiz pour annoncer un beau résultat scientifique ! Nombreux sont celles et ceux qui se sont prêtés au jeu avec des réponses facétieuses… Avant de découvrir finalement qu'il s'agissait d'une enzyme particulière, la « FAP », capable de convertir les acides gras des microalgues en hydrocarbures de type essence quand elle est activée par la lumière.



Tout comprendre à cette enzyme aux propriétés rares

Coup de cœur

Un prix pour la lumière !

Le projet NIR, mené par Cécile Moro, directrice de recherches au CEA, a reçu le prix NetExplo le 18 avril dernier. Ce projet vise à traiter des malades de Parkinson en apportant de la lumière, grâce à un implant intracérébral, au plus près des neurones des régions touchées dans le cerveau. Objectif ? Ralentir la neuro-dégénérescence et donc la maladie. Seul lauréat français de l'édition, NIR est réalisé au sein de Clinatec, le centre de recherches biomédicales qui réunit le CEA, le CHU de Grenoble et l'université Grenoble Alpes, et le Fonds de dotation. Un essai clinique, mené avec le professeur Stephan Chabardès du CHU de Grenoble, est en cours sur 14 patients.

Euclid s'apprête à éclairer l'Univers



© G. Boyer/CEA

C'est pour bientôt ! La mission Euclid et son télescope de 1,2 m de diamètre devraient s'élancer de Floride en juillet. Objectif ? Étudier l'expansion de l'Univers au cours des dix derniers milliards d'années et comprendre pourquoi elle s'accélère. À l'origine de cette mission, un projet porté par le CEA. Euclid scrutera le rôle de la matière noire et de l'énergie noire dans cette accélération, en observant la répartition des galaxies et la déformation de leurs images par l'effet de lentille gravitationnelle. Le tout à l'aide de deux instruments, l'un en lumière visible (VIS) et l'autre dans le proche infrarouge (NISP). Le CEA a participé à la réalisation de ces imageurs, dont l'équipement au cœur de VIS. Il est également responsable scientifique du segment sol, qui développe l'ensemble du traitement des données. Durant les six ans de mission, des centaines de milliers d'images seront ainsi acquises pour mieux cerner l'histoire de l'Univers et enrichir les catalogues de galaxies.

Le bon mot

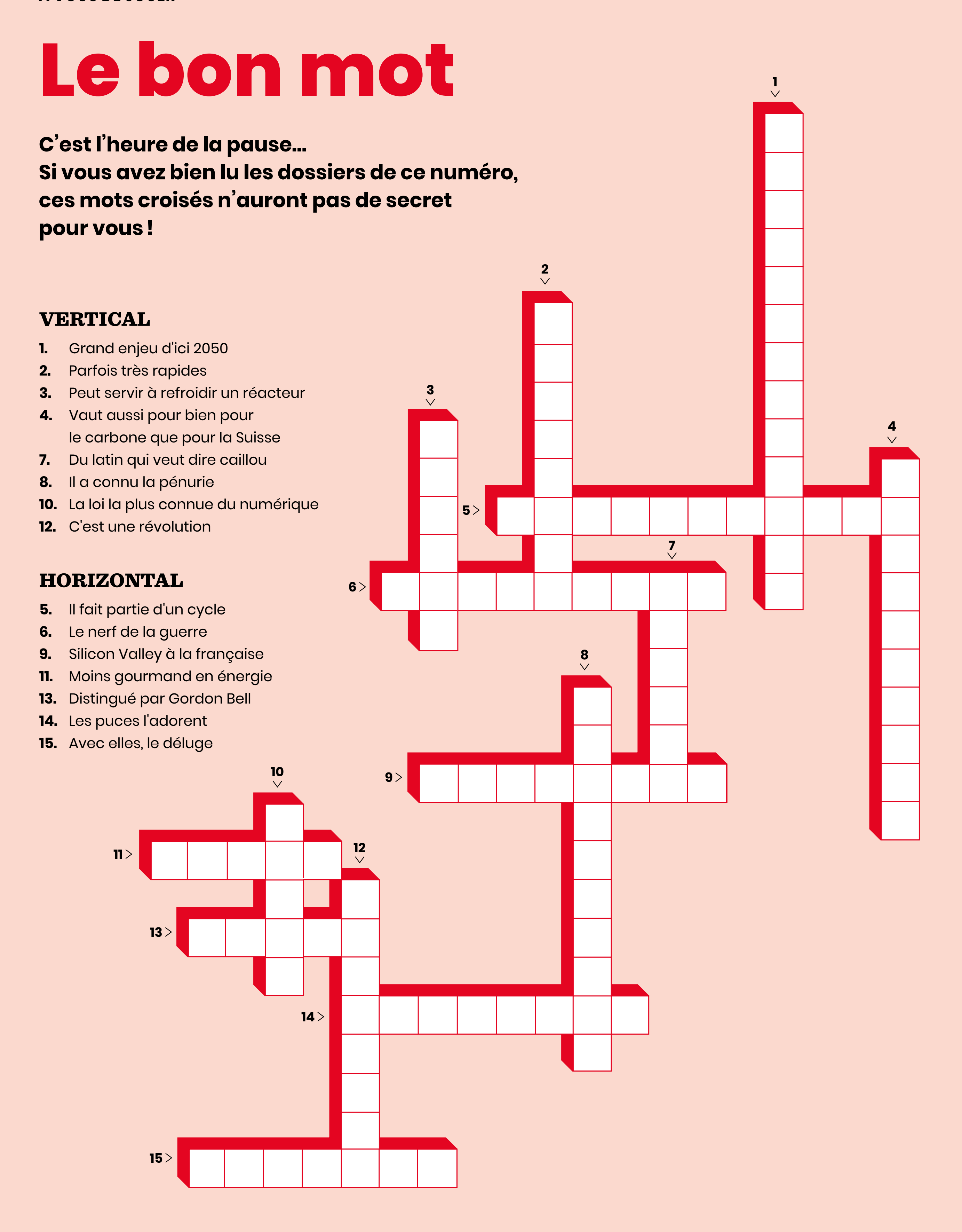
**C'est l'heure de la pause…
Si vous avez bien lu les dossiers de ce numéro, ces mots croisés n'auront pas de secret pour vous !**

VERTICAL

1. Grand enjeu d'ici 2050
2. Parfois très rapides
3. Peut servir à refroidir un réacteur
4. Vaut aussi pour bien pour le carbone que pour la Suisse
7. Du latin qui veut dire caillou
8. Il a connu la pénurie
10. La loi la plus connue du numérique
12. C'est une révolution

HORIZONTAL

5. Il fait partie d'un cycle
6. Le nerf de la guerre
9. Silicon Valley à la française
11. Moins gourmand en énergie
13. Distingué par Gordon Bell
14. Les puces l'adorent
15. Avec elles, le déluge



Vertical : 1. DECARBONATION | 2. NEUTRONS | 3. SODIUM | 4. NEUTRALITE | 7. CALCUL | 8. PROCESSEUR | 10. MOORE | 12. EXASCALE
Horizontal : 5. COMBUSTIBLE | 6. PUISSANCE | 9. GRENOBLE | 11. FDSOI | 13. WARPX | 14. SILICIUM | 15. DONNEES





Ce que nous sommes

Fort d'un modèle unique, le CEA est un organisme public de recherche dont la mission est d'éclairer la décision publique et de donner les moyens aux forces vives (État, entreprises, collectivités, monde académique) de relever les défis majeurs de notre temps : changement climatique, énergies de demain, pandémies, tensions géopolitiques, accélération des technologies numériques, accès aux ressources et matières premières...

Retrouvez toute l'actualité du CEA
et de ses recherches sur nos réseaux sociaux

Entièrement
conçue et produite
en France,
cette revue atteint
un poids de
389 gr eq.CO_2
par exemplaire.
Une empreinte
carbone équivalente
à la production
d'une orange.

Découvrez le détail de l'empreinte carbone de ce magazine ici